



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHO TOIVAKAINEN

VOIMALAITOKSEN LEIJUKATTILASSA KÄYTETTÄVÄN METSÄ-
POLTTOAINEEN LAADUNMÄÄRITYS

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunnan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 4. kesäkuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

TOIVAKAINEN, JUHO: Voimalaitoksen leijukattilassa käytettävän metsäpoltto-
aineen laadunmääritys

Diplomityö, 79 sivua, 30 liitesivua

Kesäkuu 2014

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: Professori Risto Raiko

Avainsanat: Leijukattila, Energiatase, Metsäenergia, Metsäpolttoaine, Biopoltto-
aine, Laadunmääritys, Laatu

Jatkuvasti lisääntyvä biopolttoaineiden hankinta ja käyttö energiantuotannossa ovat saaneet aikaan laatuongelmien kasvun voimalaitoksilla. Energiantuottaminen hyvällä hyötysuhteella, uusiutuvalla energialähteellä sekä mahdollisimman halvalla markkinahinnalla ovat nykypäivän trendejä kilpailun ja markkinoiden kasvaessa. Metsäteollisuudessa puupolttoaineiden laatuongelmat ovat tuoneet kustannuksia niin voimalaitokselle kuin puunhankinnalle. Laatuun sekä sen tekijöihin liittyvillä parannuksilla nähdään merkittäviä säästöjä muuttuvien kustannusten vähentämiseksi.

Tässä työssä on tarkoitus selvittää erilaisia puupolttoaineiden laadunmääritysmenetelmiä sekä tarkastella polttoaineiden määritysmenetelmistä syntyviä häviöitä. Työn ensimmäisessä osassa tullaan käsittelemään puupolttoaineiden laatutekijöitä, niiden mittaus- sekä määritysmenetelmiä. Nykyisten laadunmääritysmenetelmien vertaaminen energiapuun mittausstandardin mukaisiin menetelmiin sekä uudenlaisiin mittalaitteisiin tuo uudenlaisen näkökulman energiasisällön määrittämiseen. Toisessa osassa perehdytään leijukattilan toimintaan sekä energiataaseen määrittämiseen. Teoriaosion materiaali kerätään alan kirjallisuudesta sekä julkaisuista. Kolmannessa ja neljännessä osiossa perehdytään mittauksista saatuihin tuloksiin ja tarkastellaan niiden merkitystä energiasisältöön sekä leijukattilan energiataaseeseen.

Työn tulokset osoittavat nykyisten mittausmenetelmien olevan epätarkkoja. Nykyisten menetelmien mukaisella energiamäärityksellä muuttuvien kustannusten nousu voidaan havaita menekin lisääntyessä. Niiden tuoma hävikki on merkittävä kustannustekijä metsäteollisuudessa. Uuden teknologian hyödyntämisellä, tarkemmalla näytteenotolla, toimitusketjun hallinnalla sekä voimalaitoksen kattilan paremmalla ja helpommalla säädöllä voidaan tulevaisuudessa tuottaa energiaa entistä paremmalla lämpöhyötysuhteella sekä pienentää mittavirheisiin liittyviä muuttuvia kustannuksia merkittävästi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environment and Energy Technology

TOIVAKAINEN, JUHO: Determining the quality of forest biofuel which is used in the power plant's fluidized bed boiler

Master of Science Thesis, 79 pages, 30 Appendix pages

June 2014

Major: Power Plant and Combustion Engineering

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: Fluidized bed boiler, Energy Balance, Forest Energy, Forest Fuel, Biofuel, Quality definition, Quality

Increasing supply and use of biofuels in energy production have led to the growth of quality problems at power plant. Producing energy with good efficiency, with renewable energy sources, and as cheap market price as possible are nowadays trends when the competition and the markets are growing. In the forest industry, the quality problems in forest biofuels have brought the cost as well as to the power plant and also to the wood sourcing. Quality as well as the factors related to the improvements could be seen significant savings in reduction of variable costs.

This thesis work is intended to determine different methods to measure quality of wood-based fuels and also to look the costs which are caused from quality measure methods. The first part of thesis will be processing the quality factor of wood fuels and also different measurement and analysis methods. The current methods for determining the quality of wood fuels and the comparison those to the standard methods of energy measurements as well as new types of measuring devices, brings a new perspective to assay the energy content. In the second part of the thesis will be focused on operations in fluidized bed boiler as well as the determination of the energy balance. The theory to the thesis will be collected from the literature and publications of the energy sector and business. The third and fourth section focuses on the results of the measurements. There will be focused to look at results from the aspect of energy content and also from the aspect of energy balance of fluidized bed boiler.

The results of the thesis show that the current methods of measurement are inaccurate. Assaying the energy content with those current measurement methods could be seen with the growth of variable costs when the consumption rises. The losses of the measure methods are one of the major cost factor in the forest industry in Finland. Use of new technologies, a more detailed sampling, supply chain management, and better and easier control of power plant boiler, could be produced energy with better thermal efficiency and also reduce variable costs significantly which are related to measurement errors in the future.

ALKUSANAT

Diplomityön aiheen muodostuminen ja kehittyminen alkoi noin neljä vuotta sitten, kun työskentelin kesätoissa UPM Kymmene Oyj:n Tervasaaren paperitehtaan voimalaitoksessa energiaoperaattorina. Yliopistossa opittujen asioiden sekä kesätöiden pohjalta muodostui käsitys kehityskohteista voimalaitoksessa ja erityisesti sen puuhuollossa. Tutkimusaihe muodostui lopulliseen muotoonsa vuoden 2013 keväällä pohtiessani isäni Matti Toivakaisen kanssa kehityskohteita energiapuun hankinnan ja voimalaitoksen välillä.

Ehdotin tutkimusta UPM:lle maaliskuussa 2013 ja tutkimuksen tarkempi rajausta ja aloitus osuivat vuoden 2013 loppuun. Työ toteutettiin pääosin vuoden 2014 keväällä tammikuun ja kesäkuun välisenä aikana. Varsinaiset mittaukset suoritettiin Kaipolan voimalaitoksessa 10.–13.3.2014, joita varten vaadittiin erityisjärjestelyitä niin voimalaitoksella kuin Kaipolan energiapuuhuollossa.

Diplomityöprosessin onnistuminen sekä mittaukset ovat vaatineet monen tahon apua ja haluankin kiittää UPM Kymmene Oyj:tä mielenkiintoisesta aiheesta, jossa olen päässyt haastamaan itseni niin diplomityössä kuin mahdollisesti tulevaisuudessa. Haluan myös kiittää mittauksiin ja työn toteutukseen osallistuneita henkilöitä, jotka ovat edesauttaneet merkittävästi työn etenemistä. Työn aloituksessa ja eteenpäin viemisessä apuna ovat toimineet diplomityöni tarkastaja Risto Raiko sekä työnohjaajani Tero Anttila ja Timo Niemelä. Diplomityön mittausten suorituksessa, onnistumisessa sekä datan keräämisessä ovat auttaneet Matti Markkila, Janne Sievänen, Riikka Silmu, Janne Kovanen, Arto Heinjoki, Esa Lahtela, Tarmo Kotiniitty, Kuljetus- ja Koneurakointi Jokinen Oy sekä Kaipolan paperitehtaan voimalaitoksen energiaoperaattorit. Kiitos heille avusta ja Kaipolassa vietetystä ajasta. Mutta ennen kaikkea haluan kiittää vanhempiani, appivanhempiani sekä erityisesti puolisoani Saraa ja tytärtäni Adaa auttamisesta, tukemisesta ja kannustamisesta niin tiukkojen opiskeluvuosien kuin diplomityön aikana.

”Puut eivät puhu. Ja jos puhuvatkin, niin hiljaa. Metsällä on kuitenkin äänensä. Ja metsällä on tarinansa.”, kuvaili Veikko Huovinen kirjassaan Puukansan tarina vuonna 1984. Myös tällä diplomityöllä on tarinansa, joka alkoi neljä sukupolvea sitten Toivakaisen metsämiehien tarinana.

Tampereella 30.6.2014

Juho Toivakainen

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 1.1 | Aihealue | 1 |
| 1.1.1 | Tutkimuksen rajaus | 1 |
| 1.1.2 | Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite | 2 |
| 1.2 | Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät | 2 |
| 1.3 | Tutkimuksen toteutus | 3 |
| 2 | Puupolttoaineiden ominaisuuksia | 4 |
| 2.1 | Hake | 4 |
| 2.1.1 | Hakkuutähde | 5 |
| 2.1.2 | Ranka- ja kokopuuhake | 9 |
| 2.2 | Kuori ja kantohake | 11 |
| 3 | Polttoaineiden laadunmittaus | 12 |
| 3.1 | Näytteenotto | 12 |
| 3.1.1 | Koneellinen näytteenotto | 13 |
| 3.1.2 | Manuaalinen näytteenotto | 14 |
| 3.2 | Näytteiden lukumäärä ja tilavuus | 15 |
| 3.3 | Näytteiden analysointi | 17 |
| 3.4 | Näytteiden käsittely | 18 |
| 3.5 | Laadunmittausta koskevat säädökset | 19 |
| 4 | Polttoaineiden laadunmääritys | 21 |
| 4.1 | Polttoaineiden määrittäminen | 21 |
| 4.2 | Kosteuden määrittäminen | 21 |
| 4.3 | Lämpöarvon määrittäminen | 22 |
| 4.3.1 | Kalorimetrinen lämpöarvo | 22 |
| 4.3.2 | Tehollinen lämpöarvo | 23 |
| 4.3.3 | Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo | 23 |
| 4.4 | Polttoaineen energiatiheys saapumistilassa | 23 |
| 4.5 | Toimitetun kuorman energiamäärä | 24 |
| 4.6 | Tuhkapitoisuus | 24 |
| 5 | Palamisen termodynamiikka | 26 |
| 5.1 | Reaktioyhtälö | 26 |
| 5.2 | Palamisen stökiometria | 26 |
| 5.2.1 | Palamis- ja kaasutusreaktiot | 26 |
| 5.3 | Termodynamiikan I pääsääntö | 29 |
| 5.4 | Reaktioentalpia | 30 |
| 5.4.1 | Lämpöarvo | 30 |
| 5.5 | Taulukkoentalpia | 31 |
| 6 | Leijukattila | 34 |
| 6.1 | Leijupoltto | 34 |
| 6.1.1 | Tekniikat | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.1.2 | Kattilan lämmönsiirto | 36 |
| 6.2 | Energiatase | 37 |
| 6.2.1 | Savukaasupuoli | 38 |
| 6.2.2 | Vesi-höyrypiiri | 40 |
| 6.2.3 | Hyötysuhde | 40 |
| 7 | Case Kaipola | 41 |
| 7.1 | Tehtaan kuvaus | 41 |
| 7.2 | Mittausten toteutus | 42 |
| 7.2.1 | Mittausjärjestelyt | 42 |
| 7.3 | Polttoaineiden laadunmittausmenetelmät | 42 |
| 7.3.1 | Ämpäriotanta | 43 |
| 7.3.2 | Röntgenmittalaitteisto | 43 |
| 7.3.3 | Taselaskenta | 45 |
| 7.4 | Kaipolassa poltettavat polttoaineet | 45 |
| 8 | Polttoaineiden laadun mittaustulokset | 47 |
| 8.1 | Kosteus | 47 |
| 8.1.1 | Pienkokopuu ja ranka | 47 |
| 8.1.2 | Kanto | 49 |
| 8.1.3 | Metsähakkuutähde | 50 |
| 8.1.4 | Turve | 51 |
| 8.1.5 | Kuori ja liete | 52 |
| 8.2 | Epäpuhtaudet | 53 |
| 8.2.1 | Pienkokopuu ja ranka | 54 |
| 8.2.2 | Kanto | 54 |
| 8.2.3 | Metsähakkuutähde | 55 |
| 8.3 | Tehollinen lämpöarvo | 56 |
| 8.3.1 | Pienkokopuu ja ranka | 56 |
| 8.3.2 | Kanto | 57 |
| 8.3.3 | Metsähakkuutähde | 58 |
| 8.3.4 | Turve | 59 |
| 8.3.5 | Kuori ja liete | 60 |
| 8.4 | Kuorman energiasisältö | 61 |
| 8.5 | Leijukattilan energiatase | 63 |
| 8.5.1 | Savukaasupuoli | 63 |
| 8.5.2 | Vesi-höyrypiiri | 64 |
| 8.5.3 | Hyötysuhde | 64 |
| 9 | Polttoaineiden laaduntarkastelu | 66 |
| 9.1 | Laadun vaikutus energiasisältöön | 66 |
| 9.1.1 | Kosteus | 66 |
| 9.1.2 | Vierasaineet | 70 |
| 9.1.3 | Toimitusketjun hallinta | 71 |
| 9.2 | Kattilan energiataseen mukainen hävikki | 72 |

| | |
|--|-----|
| 9.3 Mittausvirheet | 73 |
| 10 Yhteenveto | 76 |
| Lähteet..... | 78 |
| Liite 1: Puupolttoaineiden ominaisuuksia..... | 80 |
| Liite 2: Korrelaatiokertoimet kylläisen höyryn osapaineen polynomisovitteeseen | 81 |
| Liite 3: Aineiden muodostumisentalpioita | 82 |
| Liite 4: Yleisten kaasujen taulukkoentalpiat | 83 |
| Liite 5: Kaasujen moolimassat ja kaasuvakiot | 91 |
| Liite 6: Ominaislämpösovitteen C_k kertoimet..... | 92 |
| Liite 7: Palamisilman ja savukaasujen taulukkoentalpiat | 93 |
| Liite 8: Vesihöyryn entalpia-entropia diagrammi | 95 |
| Liite 9: Kylläisen veden ja vesihöyryn ominaisuuksia | 96 |
| Liite 10a: Mittauspöytäkirja (pienkokopuu ja ranka) 10.–12.3.2014 | 97 |
| Liite 10b: Mittauspöytäkirja (kanto) 10.3.2014 | 98 |
| Liite 10c: Mittauspöytäkirja (kanto) 11.3.2014 | 99 |
| Liite 10d: Mittauspöytäkirja (kanto) 12.3.2014 | 100 |
| Liite 10e: Mittauspöytäkirja (metsähakkuutähde) 10.3.2014 | 101 |
| Liite 10f: Mittauspöytäkirja (metsähakkuutähde) 11.3.2014 | 102 |
| Liite 10g: Mittauspöytäkirja (metsähakkuutähde) 12.3.2014 | 103 |
| Liite 10h: Mittauspöytäkirja (turve) 10.–12.3.2014..... | 104 |
| Liite 11: Metsäpolttoainekuormien teholliset lämpöarvot saapumiskosteudessa | 105 |
| Liite 12: Turvekuormien teholliset lämpöarvot saapumiskosteudessa | 106 |
| Liite 13: Kattilan savukaasupuolelle sisään menevät lämpötehot mittausten aikana.... | 107 |
| Liite 14: Kattilan savukaasupuolelta ulos tulevat lämpötehot mittausten aikana | 108 |
| Liite 15: Vesi-höyrypiirin lämpötilat, paineet, entalpiat, massavirrat ja lämpötehot.... | 109 |
| Liite 16: JUP-höyryn massavirta, lämpötila, paine, entalpia ja hukcateho..... | 110 |

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | | |
|--------------|--|----------------------|
| Φ | Lämpövirta | MW |
| φ | Suhteellinen ilmankosteus | |
| λ | Ilmakerroin | |
| η | Hyötysuhde | |
| A | Tuhkapitoisuus | % |
| $c_{p,i}$ | Ominaislämpökapasiteetti | kJ/kgK |
| D | Polttoaineen irtotiheys eli tilavuuspaino | kg/i-m ³ |
| E | Energiatiheys | MWh/i-m ³ |
| H | Entalpia | kJ/kg |
| H_f | Muodostumisentalpia | kJ/mol |
| H_{mt} | Tuntuva eli taulukkoentalpia | kJ/mol |
| H_r | Reaktioentalpia | kJ/mol |
| M | Näytteen kosteus | % |
| m | Massa | kg |
| \dot{m} | Massavirta | kg/s |
| N | Moolimäärä | mol/kg |
| \dot{N} | Moolivirta | kmol/s |
| p | Paine | bar |
| Q | Lämpöarvo | MJ/kg |
| $Q_{gr,d}$ | Kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo | MJ/kg |
| $Q_{gr,ad}$ | Ilmakuivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo | MJ/kg |
| $Q_{net,d}$ | Kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo | MJ/kg |
| $Q_{net,ar}$ | Saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo | MJ/kg |
| R | Kaasuvakio | kJ/kgK |
| T | Lämpötila | K |
| U | Sisäenergia | |
| V | Tilavuus | |
| W | Tehty työ | |
| w | Veden määrä kosteassa polttoaineessa | m-% |
| x | Massaosuus | |

Alaindeksit ja lyhenteet

| | |
|------|---------------------------|
| ad | Ilmakuiva |
| ar | Saapumistilassa |
| BMA | Biomass Moisture Analyzer |
| d | Kuiva-aine |
| eko | Syöttöveden esilämmitin |
| gr | Kalorimetrinen |
| häv | Häviöt |
| i | Polttoilma |
| jä | Jäähdytys |
| lh | Lämpö höyryyn |
| luvo | Palamisilman esilämmitin |
| nh | Nuohoushöyry |
| pa | Polttoaine |
| pi | Polttoilma |
| ref | Referenssi |
| rv | Ruiskutusvesi |
| sis | Sisään |
| sk | Savukaasu |
| sv | Syöttövesi |
| sät | Säteily- ja johtuminen |
| th | Tuorehöyry |
| tu | Tuhka |
| up | Ulospuhallus |

Alkuaineet ja yhdisteet

| | | | |
|---|-------|------------------|----------------|
| C | Hiili | O ₂ | Happimolekyyli |
| H | Vety | N ₂ | Typpimolekyyli |
| O | Happi | CO ₂ | Hiilidioksidi |
| N | Typpi | H ₂ O | Vesi |
| S | Rikki | SO ₂ | Rikkidioksidi |

1 JOHDANTO

Bioenergian kulutus ja käyttö ovat kasvaneet Suomessa viime vuosina huomattavasti. Bioenergian osuus on runsaat 25 % (90 TWh) kokonaisenergiankulutuksesta (Finbio Ry 2013). Bioenergialla tarkoitetaan uusiutuvia polttoaineita, joita voidaan käyttää ympäristöystävällisesti vähentäen kasvihuonekaasu- sekä rikkipäästöjä.

Tuontien energian osuus Suomessa on yli 70 %, mutta koko ajan pyritään lisäämään kotimaisen energian käyttöä (Knuuttila 2003). Kotimaisella energialla voidaan käsittää puuperäiset polttoaineet, turve sekä vesivoima. Tämän lisäksi jatkuvasti pyritään lisäämään kierrätysmateriaalien sekä jätteiden käyttöä energian tuotannossa.

Kansainvälinen ilmastopöytäkirja on sitouttanut Suomen vähentämään hiilidioksidin sekä muita kasvihuonepäästöjä (Finbio Ry 2013). Uusiutuvilla energialähteillä onkin keskeinen merkitys tavoitteiden saavuttamisessa. Tiukkenevien päästörajoitusten sekä polttoainekustannusten nousu ovat johtaneet energiantuotantolaitokset tarkastelemaan polttoainevirtojaan uudella menetelmällä. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia voimalaitoksen leijukattilassa käytettävän metsäpolttoaineen laatua sekä tarkastella eri laadunmäärittämenetelmiä.

1.1 Aihealue

Diplomityön aihe on voimalaitoksen leijukattilassa käytettävän metsäpolttoaineen laadunmäärittäminen, joka tullaan toteuttamaan neljällä eri laadunmittausmenetelmällä sekä kattilan energiataseen kautta laskettavalla polttoaineteholla. Mittauksessa keskitytään metsäpolttoaineisiin ja tarkemmin metsäenergian laadunmittaamiseen voimalaitoksella. Työssä tullaan käyttämään uudenlaista laadunmittaustekniikkaa, jolla on tarkoitus pystyä määrittämään huomattavasti tarkemmin polttoaineen laatua ja koostumusta kuormakohtaisesti. Laadunmäärittäminen ja sillä saatavaa energiamäärää tullaan vertaamaan kattilasta saatavaan energiaan.

Aihealue määrytyi UPM:n tarpeesta toteuttaa metsäenergian laaduntarkastelu voimalaitoksessa havaittujen häviöiden johdosta. Metsäenergian laadunmäärittäminen onkin päivän polttavia kysymyksiä päästöjen rajoittamisen sekä ilmastopöytäkirjan syys-tä. Laadun parantamisella ja toimitusketjun hallinnalla voidaan tulevaisuudessa tuottaa puhtaamman energialisäksi myös merkittäviä säästöjä voimalaitoksille.

1.1.1 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus rajataan yhden voimalaitoksen polttoainevirtojen tarkasteluun. Voimalaitoksen polttoainevirtoja tullaan tarkastelemaan määrätyn ajanjakson aikana, jolloin pyritään

selvittämään mahdollisimman tarkasti syötettävien polttoaineiden laatu. Polttoaineiden kosteusmittaukseen tullaan käyttämään neljää eri menetelmää, Senfit BMA pikakosteusmittaria yksittäisnäytteisiin, yksittäisnäytteistä koottavaan kokoomanäytteeseen uunikuivaus menetelmää, kuskin ottamaa normaalia laadunmääritystä sekä uudenlaista röntgenmittausjärjestelmää. Haasteellisen tutkimuksesta tekee polttoaineen suuri käsittelymäärä sekä polttoaineen syötön järjestelyt. Osa kattilassa käytettävästä polttoaineesta päätyykin kattilaan ohi mittalaitteiston, joten käsinäytteiden määrä ohimenevästä virrasta tullaan mitoittamaan siten, että tarkasteluajanjaksona näytteitä otetaan normaalia enemmän tarkempien tuloksien saamiseksi.

Laadunmittausta tullaan tarkastelemaan kattilan taselaskennan keikoin. Polttoaineet syötetään leijukattilaan, josta määritetään tutkimuksen aikana energia- sekä massavirrat, joiden avulla pystytään määrittämään polttoaineiden lämpöhäviöitä. Kattilan kuorma pyritään pitämään lähellä maksimia, jotta voidaan saada mahdollisimman eksakteja tuloksia. Tutkimuksen laajuuden vuoksi kattilan taselaskentaan ei tulla kiinnittämään tarkemmin huomiota vaan pyritään selvittämään ainoastaan merkittävät kattilan sisään tulevat ja ulos menevät entalpiavirrat. Entalpiavirtojen laskemiseksi arvot saadaan suoraan kattilan säätöjärjestelmästä. Tutkimuksen painopiste pyritään pitämään polttoaineen laadunmäärityksessä ja sen vaikutuksessa kattilan toimintaan.

1.1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoite

Tutkimusongelma muodostui diplomityönohjaajani ehdotuksesta sekä oman kokemukseni ja kandidaatintyöni pohjalta. Metsäpolttoaineiden laatuongelmat ovat näkyneet jo usean vuoden ajan voimalaitoksien käytössä ja niiden polttaminen on paikoittain erittäin haastavaa. Polttoaineiden laadunmittauksella pyritään selvittämään seuraavat asiat:

- Polttoaineiden kosteus
- Polttoaineiden kosteuden vaikutus lämpöarvoon
- Polttoaineiden epäpuhtaudet
- Polttoaineiden epäpuhtauksien vaikutus lämpöarvoon

Työ tullaan toteuttamaan energiataselaskennan keinoin kattilan polttoaine- ja lämpövirtoja tarkkailemalla. Kattilan energia- ja massavirtojen avulla pyritään selvittämään seuraavia asioita:

- Kattilan hyötysuhde
- Häviöt polttoaineissa

Tutkimuksen tavoite on pyrkiä tarkastelemaan polttoaineen laatua ja sen vaikutuksia kattilan toimintaan sekä ottaa kantaa polttoaineen energiasisältöön ja sen kustannuksiin.

1.2 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät

Teoria osuus sisältää polttoaineen laadun määrittämiseen liittyvää teoriaa ja laskentaa, joissa käydään läpi käytössä olevat määrittämenetelmät sekä laskentakaavat. Kappaaleessa 2 esitellään tutkimuksen aikana mitattujen polttoaineiden ominaisuuksia sekä

tuotantoa. Kolmannessa kappaleessa paneudutaan energiapuun laadunmittaukseen sekä näytteenottoon, joka tullaan toteuttamaan mittausten aikana viimeisimpien standardien mukaisesti. Neljännessä kappaleessa esitellään polttoaineiden laadunmäärittäykseen vaadittavat yhtälöt sekä laskentatavat, joiden avulla tullaan tarkastelemaan laadun vaikutuksia polttoaineiden energiamäärään sekä kattilan toimintaan.

Kattilan toimintaan ja energiataseen määrittämiseen perehdytään kappaleissa viisi ja kuusi. Viidennessä kappaleessa käsitellään termodynamiikan lakeja sekä entalpioiden määrittäystä. Kuudennessa kappaleessa käsitellään leijukattilaa yleisellä tasolla ja selvitetään energiataseen määrittämisen taustalle teoria, jota tarvitaan taseen laskemiseen.

Diplomityön mittaukset tullaan toteuttamaan Kaipolan paperitehtaalla, joka esitellään kappaleessa seitsemän. Tässä kappaleessa käydään myös läpi työssä käytettävät mittausten menetelmät. Mittaustulokset esitellään kappaleessa kahdeksan ja niiden empiiriseen tarkasteluun perehdytään kappaleessa yhdeksän.

Taloudellisessa tarkastelussa on tarkoitus ottaa kantaa kuorman energiasisällön vaihteluihin eri mittausmenetelmien välillä sekä toimitusketjussa syntyviin häviöihin.

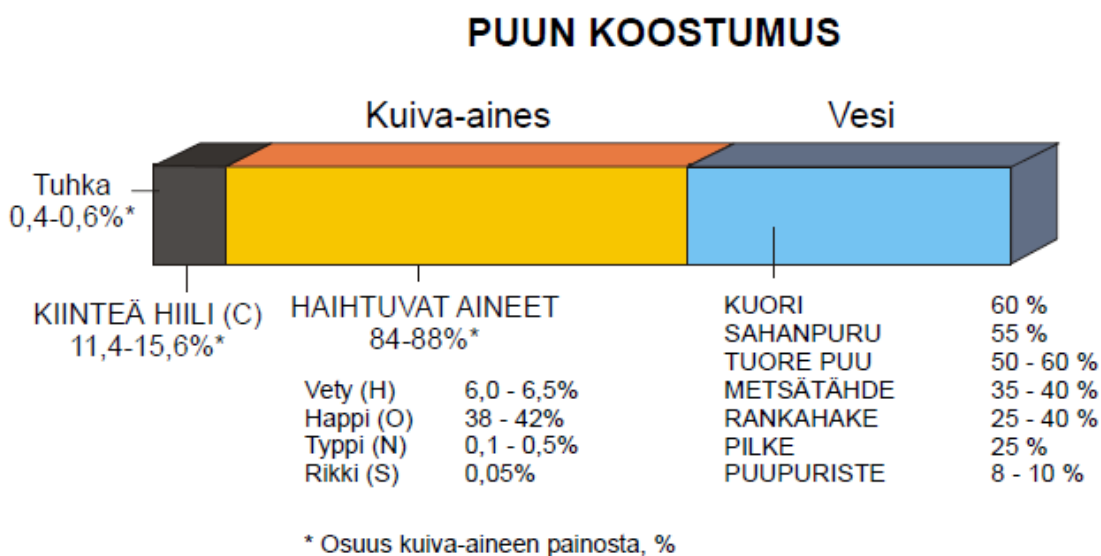
1.3 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus tullaan toteuttamaan loppuvuoden 2013 ja kevään 2014 välisenä aikana UPM Wood sourcing and forestry:n toimesta UPM Kymmene Oyj:n Kaipolan paperitehtaan voimalaitoksella yhteistyössä Tampereen Teknillisen Yliopiston Kemian ja biotekniikan laitoksen kanssa. Tutkimus käynnistetään loppuvuodesta 2013 suunnittelemalla tutkimuksen aihetta sekä rajaamalla tutkimus. Kaipolan voimalaitos valikoitui tutkimuskohteeksi UPM:n puolesta, sillä polttoainemurskan jälkeisellä polttoainekuljettimella oli valmiiksi asennettu syksyllä 2013 röntgenteknologiaa hyödyntävä mittalaitteisto. Mittalaitteiston toiminnasta ja järjestelyistä vastaa Inray Oy.

Polttoaineiden laatumittaukset suoritetaan kevään 2014 aikana Kaipolan voimalaitoksen metsäpolttoainemurskalla. Mittauksia varten polttoaineiden toimitukset keskitetään yhdelle toimittajalle mahdollisten punnitusvirheiden pois sulkemiseksi. Mittauksia varten myös logistiikan ohjaus suoritetaan normaalitilannetta intensiivisemmin. Mittausten suorittamiseen varataan kolme päivää, jona aikana polttoainekuljettimella pyritään mittaamaan jatkuvasti metsäpolttoaineita röntgenmittalaitteistolla. Tutkimus pyritään saamaan valmiiksi kevään 2014 aikana.

2 PUUPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA

Puupolttoaineiden tärkeimmät rakenneaineet ovat selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini, joiden osuudet vaihtelevat paljon puulajeittain. Lisäksi puussa on useita eri uuteaineita (terpeeneja, rasva-aineita ja fenoleja) joista esimerkiksi puun pihka koostuu. Haihtuvien aineiden osuus puussa on suuri, noin 80–90%, josta syystä puuta voidaan nimittää pitkäliekkiseksi polttoaineeksi. Pitkäliekkiselle polttoaineelle ominaista on, että se vaatii suuren palotilan. (Alakangas 2000, s. 35.)



Kuva 2.1. Puun koostumus (Alakangas et. al. 1987).

Puupolttoaineet voidaan luokitella eri luokkiin niiden laadun tai alkuperän mukaan (Alakangas 2000, s. 46). Puun laatuun vaikuttavat tekijät sekä sen koostumus ovat esitetty kuvassa 2.1. (Alakangas et. al. 1987). Puupolttoaineiden keskimääräiset ominaisuudet on kerätty liitteessä 1 esitettyyn taulukkoon (Raiko et al. 2002, s. 136). Tässä luvussa käsitellään mittausten aikana voimalaitoksella käytettäviä puuperäisiä polttoaineita sekä tarkastellaan niiden laatuun vaikuttavia seikkoja.

2.1 Hake

Voimalaitoksilla käytettävät hakkeet käsitetään hakkurilla tehdyiksi polttoaineiksi, jotka ovat haketettu kokopuusta, rangoista, metsätähteestä tai muusta puuaineksesta. Hakkeen tärkeimmäksi laatuominaisuudeksi voidaan luokitella sen kosteus.

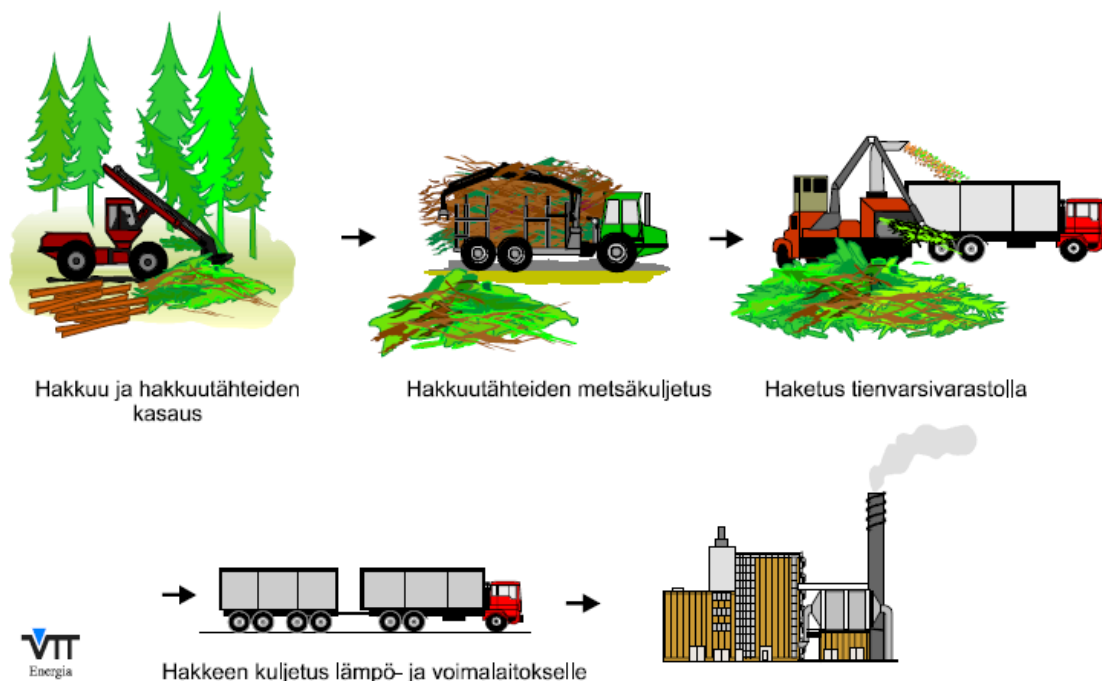
Tunnettaessa kosteus, voidaan merkittävimpana epävarmuustekijänä pitää polttoaineen tiiveyttä. Tiiveys vaihtelee paljon polttoaineittain ja se riippuu haketustavasta,

murskauksesta sekä vaikuttaa suoranaisesti kuljetettaviin polttoainemääriin. Tärkeimpinä kuormaan vaikuttavina tekijöinä pidetään polttoaineen palakokoa, palan muotoa, puulajia, oksia, kosteutta, vuodenaikaa, kuormausmenetelmää ja painumista. (Alakangas 2000, s. 48.)

2.1.1 Hakkuutähde

Hakkuutähteellä käsitetään harvennuksilta ja uudishakkuukohteilta saatavaa puupolttoainetta, josta voidaan tuottaa voimalaitoksilla lämpöenergiaa. Pääosa Suomessa käytetävästä hakkuutähteestä kerätään uudishakkuukohteilta, joissa hakkuutähde koostuu pääosin latvusmassasta ja runkohukkapuusta (Bioenergiapörssi 2013). Hakkuutähdekeritymät uudisaloilta muodostavat parhaan mahdollisuuden tuottaa metsäenergiaa kilpailukykyiseen hintaan. (Alakangas 2000, s. 50.)

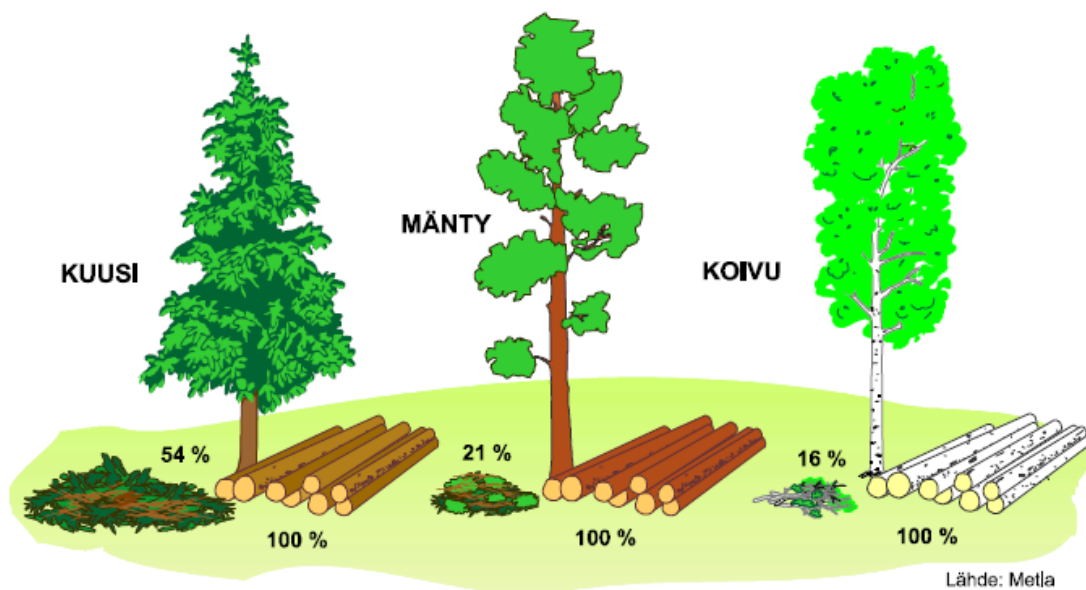
Hakkuutähteen korjaaminen metsästä tienvarsivarastolle voimalaitoskuljetusta varten tapahtuu, joko suoraan hakkuun jälkeen tuoreena tai kesäkauden jälkeen kuivuneena. Suomessa yleisesti käytössä oleva tienvarsihaketusmenetelmä on esitetty kuvassa 2.2. (Alakangas et al. 1999). Muita käytössä olevia menetelmiä ovat muun muassa voimalaitoshaketus sekä paalausmenetelmä, jossa hakkuutähteet paalataan noin 450 - 550 kg tiiviisiin nippuihin. (Alakangas 2000, s. 50.)



Kuva 2.2. Tienvarsikuljetukseen perustuva hakkuutähteiden korjuumenetelmä (Alakangas et al. 1999).

Hakkuualalta kerättävään hakkuutähteen määrään vaikuttaa puulaji, ainespuunmäärä, puuston järeys sekä oksaisuus ja lahon määrä. Kuvassa 2.3. on esitetty uudiskypsen puuston hakkuutähde kertymät, josta voidaan havaita, että kuusella kertymä on yli puolet isompi verrattuna männyn ja koivun kertymään. Hakkuutähteiden kerääminen kannattavasti vaatii noin 200 m³/ha ainespuukertymän uudishakkuilta,

jolloin talteen saadaan noin 40-60 m³/ha haakuutähdettä. Hakkuutähteitä korjataan myös ensiharvennus- sekä muista nuorenmetsän kunnostuskohteilta, jolloin pääosa energiapuusta korjataan koko- sekä rankapuuna. (Alakangas 2000, ss. 50 - 51; Bioenergiapörssi 2013.)

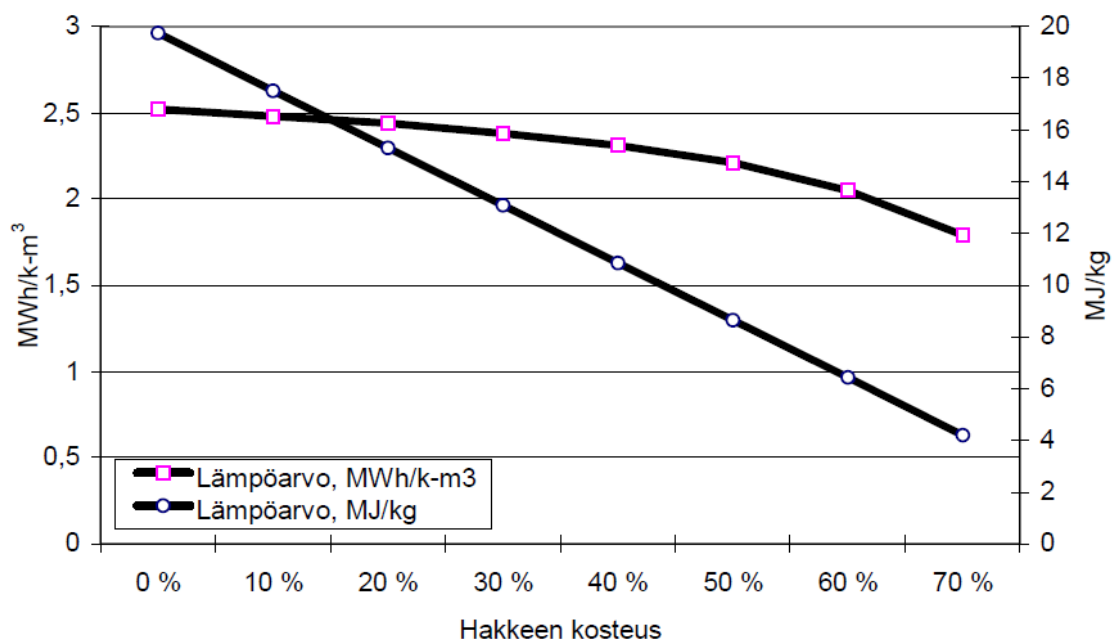


Kuva 2.3. Uudiskypsän puuston biomassakertymät (latvusmassa/runkomassa, %) (Hakkila 1992).

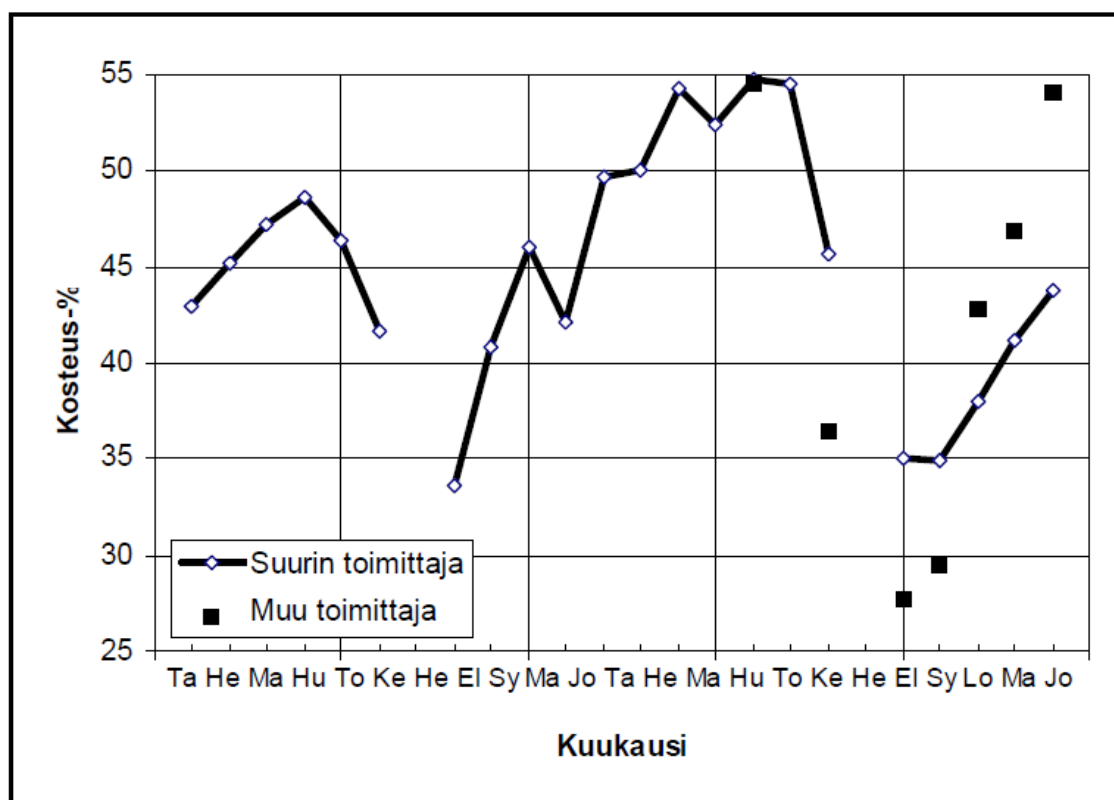
2.1.1.1 Poltto-ominaisuudet

Hakkuutähde soveltuu hyvin läpi vuoden suurien voimalaitoksien polttoaineeksi, mikäli sen kattila on suunniteltu märille polttoaineille. Polttoturpeelle suunnitelluissa kattiloissa hakkuutähde ei sovellu yksinään talvikäytössä, sillä sen energiatiheys ei riitä tuottamaan tarpeeksi suurta tehoa. Pienemmillä kattiloilla voidaan hakkuutähdettä käyttää pääosin ainoastaan kesäaikana, jolloin sen laatu on parempaa. (Impola 1995.)

Hakkuutähteen tärkeimmät laatuominaisuudet energiasaannon kannalta ovat irto-kuutiometrin kuivamassa, kosteus sekä tehollinen lämpöarvo. Kosteuden vaikuttaessa suoraan teholliseen lämpöarvoon ja energiatihyyteen on laitoksen energiahäyödyn kannalta tärkeää saada hakkuutähde mahdollisimman kuivana laitokselle. Kuvassa 2.4. on kuvattu hakkuutähteen kosteuden vaikutusta teholliseen lämpöarvoon. Kosteuteen vaikuttaa muun muassa vuodenaika sekä varastointi menetelmä. Kesällä voidaan päästä jopa alle 30 %:n kosteuksiin, kun talvelle se voi nousta jopa 65 %:iin. Kuvasta 2.5. voidaan havaita kuin eri vuodenaikat vaikuttavat metsähakkuutähteen kosteuteen. (Alakangas 2000, ss. 53 - 55.)



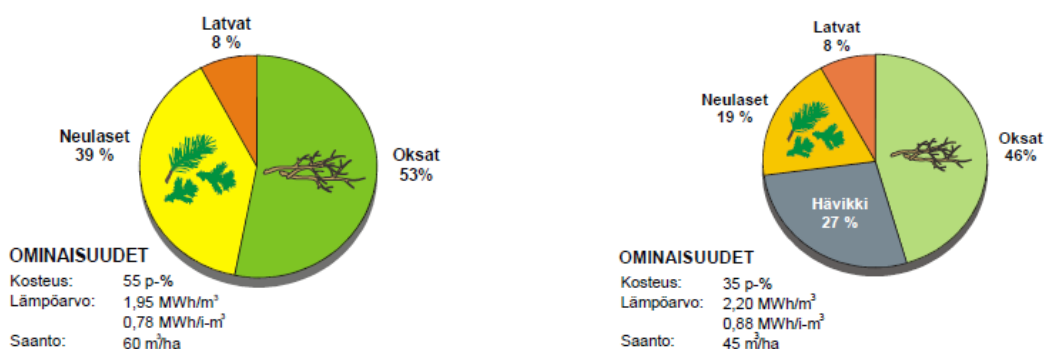
Kuva 2.4. Hakkuutähteen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/m³ ja MJ/kg) (Alakangas 2000, s. 53).



Kuva 2.5. Hakkuutähteen toimituskosteuden vuodenaikainen vaihtelu Mikkelin Purisialan voimalaitoksella (Impola 1995).

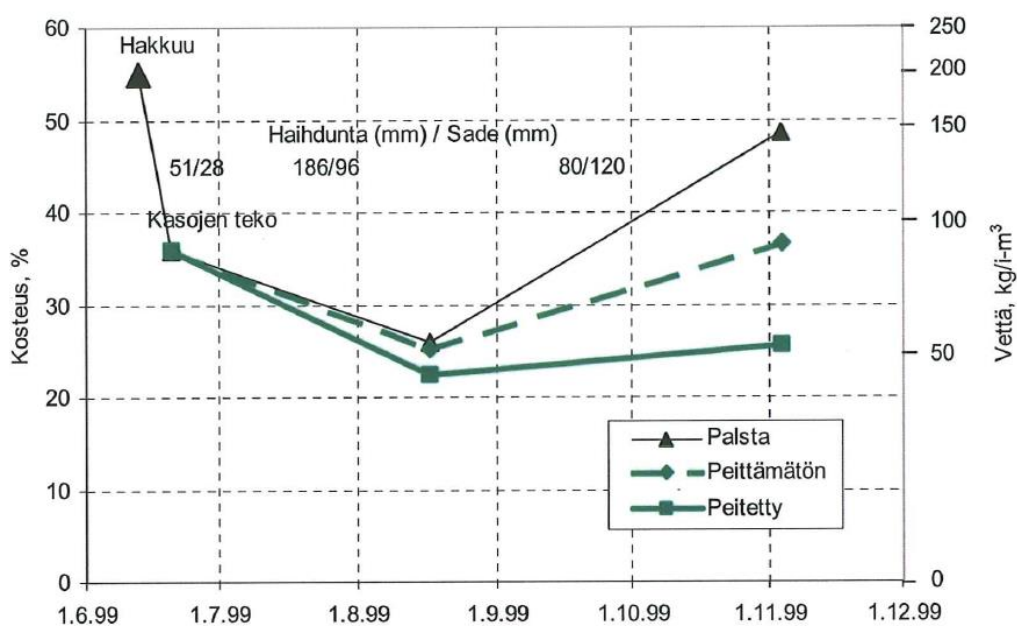
Hakkuutähteen kuivattaminen palstalla laskee sen kosteutta 50 – 60 %:sta jopa 20 – 30 %:iin, jolloin osa neulasista varisee pois ja puuainepitoisuus kasvaa. Samalla kuitenkin saanto pienenee noin 20 – 30 %, johtuen neulasten varisemisesta, jolloin kokonais-

saanto on 45 %. Kuvassa 2.6. on esitetty tuoreen ja kuivahtaneen kuusihakkuutähteen erot puuaines-, kuori- ja neulaskertymissä. (Alakangas et al. 1999.)



Kuva 2.6. Kuusihakkuutähteen koostumus tuoreena (vasen) ja kuivahtaneena (oikea) (Alakangas et al. 1999).

Hakkuutähteen kosteuteen ja laatuun voidaan vaikuttaa merkittävästi myös varastoinnilla sekä erityisesti eri varastointiteknikoilla. Varastokasojen peittäminen ns. ter-
vapaperilla on yksi tapa suojata kasaa kastumiselta ja vaikuttaa näin hakkuutähteen kui-
vumiseen. Erityisesti alkukesällä kuivuminen on nopeaa, jolloin kosteus laskee 14 – 20
% ensimmäisen kahden kuukauden aikana. Syksyisin sateen vaikutus on merkittävä
tekijä polttoainekasan kastumiseen. Kuvasta 2.7. voidaan havaita, että peitetyn kasan
kosteus on 10 – 15 % alhaisempi kuin peittämättömässä kasassa. Talvella kosteus voi
nousta merkittävästi haketuksen aikana sekä sulamisvesien ja lumen imeytyessä hak-
kuutähteisiin. (Alakangas 2000, s. 56; Hillebrand 2009, ss. 12 – 13.)



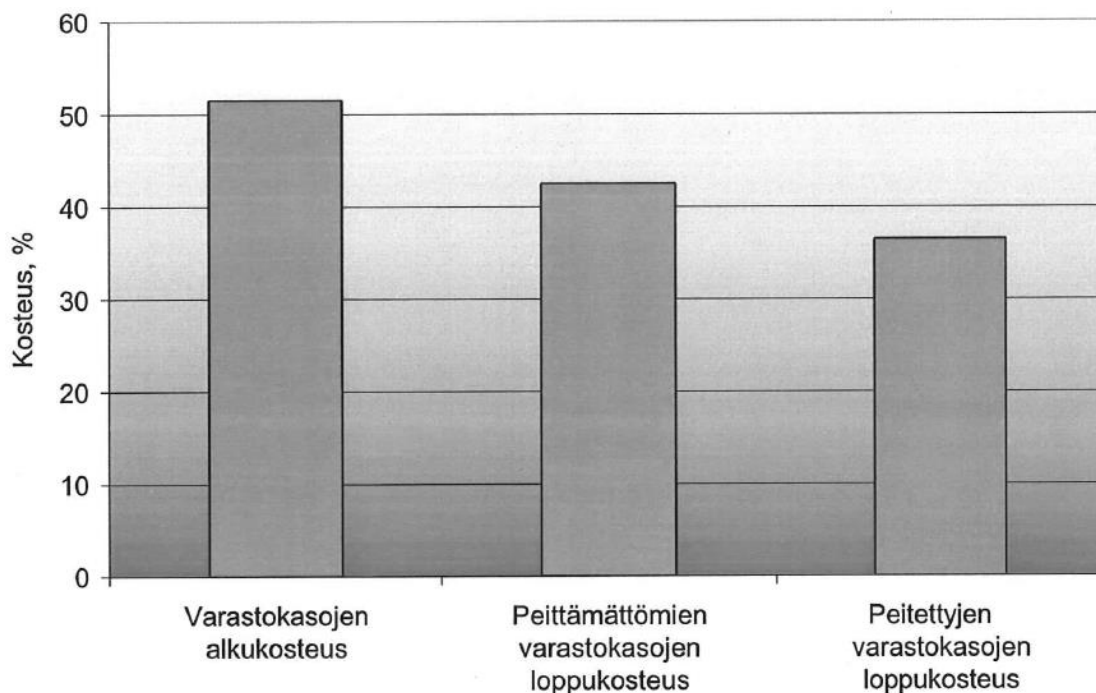
Kuva 2.7. Kesäkuussa tehtyjen varastokasojen ja palstalla olleiden hakkuutähteen kosteudet (Hillebrand & Nurmi 2001).

2.1.2 Ranka- ja kokopuuhake

Ranka- ja kokopuuhakkeita voidaan pitää laadultaan tasaisempina kuin hakkuutähdehakeita ja näin ollen sen käyttöominaisuudet ovat keskimäärin paremmat. Rankahaketta saadaan tuotettua metsänhoitotöiden ja korjuun yhteydessä jäävästä karsitusta runkopuusta. Kokopuuhaketta taas valmistetaan karsimattomasta hukkarunkopuusta tai teollisuudelle kelpaamattomasta pienpuusta. (Alakangas 2000, s. 59.)

2.1.2.1 Poltto-ominaisuudet

Ranka- ja kokopuu kuivuvat parhaiten välivarastoinnin aikana, jolloin yhden kesän aikana kosteus voi laskea alle 40 %:iin. Talvella pienkokopuu ei kastu hakkuutähteiden tapaan. Tutkimuksissa on havaittu, että koivu- ja mäntykokopuun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo ei muutu juurikaan varastoinnin aikana, mutta kosteuden muutoksesta aiheutuva lämpöarvon kasvu on merkittävä laatutekijä tarkasteltaessa varastointi menetelmiä. (Hillebrand 2009, s. 5.)



Kuva 2.8. Varastokasan peittämisen vaikutus ranka- ja kokopuun kosteuteen (Hillebrand & Nurmi 2004).

Varaston peittämisellä on havaittu merkittäviä vaikutuksia polttoaineen laatuominaisuuksiin. Tekovaiheessa kasojen keskikosteus on ollut 52 % ja haketuksen yhteydessä niiden kosteus on laskenut peittämättömän osalta 42 %:iin ja peitettyjen 36 %:iin. Kuvasta 2.8. voidaan havaita kosteuden olevan 6 % pienempi peitettyssä kasassa verrattuna peittämättömään. Ranka- ja kokopuun osalta varastokasan peittämisellä ei ole siten yhtä suurta merkitystä kuin hakkuutähteiden osalta, mutta suurin etu peittämisellä saavutetaan lumen sulamisesta aiheutuvasta kosteuden lisäyksestä. Taulukossa 2.1. on esitetty

tyypillisiä ranka ja kokopuun tehollisia lämpöarvoja kuiva-aineelle eri puulajeittain. Taulukkoon 2.2. on koottu ensiharvennusmännikön tyypillisiä ominaisuuksia Etelä-Suomessa. (Hakkila et al. 1995; Hillebrand 2009, s. 6.)

Taulukko 2.1. Ranka ja kokopuun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo eri puulajeille (Nurmi 1993).

| Puulaji | Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg | |
|-------------|--|---------|
| | Ranka | Kokopuu |
| Mänty | 19,33 | 19,53 |
| Kuusi | 19,02 | 19,29 |
| Hieskoivu | 19,19 | 19,30 |
| Rauduskoivu | 19,15 | 19,21 |
| Harmaaleppä | 19,00 | 19,18 |
| Tervaleppä | 19,31 | 19,31 |
| Haapa | 18,65 | 18,65 |

Taulukko 2.2. Eteläsuomalaisen ensiharvennusmännyn runkopuun keskimääräiset ominaisuudet pystypuustossa (Hakkila et al. 1995).

| Ominaisuus | Koko runko | Runko | | Latvan hukkapuu, cm | | |
|---------------------------------|------------|-------|-------|---------------------|------|------|
| | | >6 cm | >8 cm | 6–8 | 4–6 | 1–4 |
| KUOREN MÄÄRÄ | | | | | | |
| Paksuus | 4,5 | 4,6 | 5,0 | 2,4 | 2,3 | 1,8 |
| Tilavuusosuus, % | 15,4 | 15,2 | 15,6 | 13,5 | 17,4 | 25,5 |
| Kuivamassaosuus, % | 10,1 | 9,8 | 9,8 | 10,5 | 13,9 | 21,4 |
| KUIVA-TUORETIHEYS, kg/m³ | | | | | | |
| Kuoreton puu | 395 | 397 | 399 | 377 | 371 | 365 |
| Kuorellinen puu | 376 | 377 | 379 | 361 | 352 | 340 |
| Kuori | 267 | 266 | 265 | 275 | 274 | 278 |
| KUORELLISEN PUUN VESI | | | | | | |
| Kosteus, % | 59 | 58 | 58 | 61 | 62 | 63 |
| Kosteussuhde, % | 141 | 140 | 138 | 158 | 164 | 170 |
| KOOSTUMUS, kg/m³ | | | | | | |
| Uutteeton puuaines | 327 | 329 | 331 | 312 | 293 | 258 |
| Puuaineen asetoniuute | 11 | 11 | 11 | 11 | 10 | 9 |
| Kuori | 38 | 37 | 37 | 38 | 49 | 73 |
| Vesi | 530 | 528 | 523 | 570 | 577 | 578 |
| Yhteensä = tuoretiheys | 906 | 905 | 902 | 931 | 929 | 918 |
| ENERGIATIHEYS, MWh/m³, tuoreena | | | | | | |
| Kuorellinen puu | 1,85 | 1,85 | 1,86 | 1,78 | 1,73 | 1,67 |
| Kuoreton puu | 1,94 | 1,95 | 1,96 | 1,85 | 1,82 | 1,79 |
| Kuori | 1,18 | 1,17 | 1,17 | 1,21 | 1,21 | 1,23 |
| KUORELLISEN PUUN TUHKA, kg/m³ | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,5 | 2,9 |

2.2 Kuori ja kantohake

Voimalaitoksilla poltettavaa puun kuorta saadaan teollisuuden sivutuotteena puun kuorimoilta. Kuori muodostuu ulkokuoresta ja sisäkuoresta eli nilasta, joiden osuus runkopuusta on 10 – 20 % ja oksissa jopa 60 %. Kuoren sisältäessä merkittävän määrän ligniiniä, on sen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo korkea, joka sisäkuoressa on keskimäärin 19 – 20 MJ/kg ja ulkokuoressa 20 – 32 MJ/kg. (Alakangas 2000, s. 66.)

Tehollinen lämpöarvo vaihtelee paljon riippuen puulajista ja laadusta, mutta sen kosteus- ja tuhkapitoisuudet heikentävät merkittävästi sen poltto-ominaisuuksia. Tästä syystä kuorta poltetaan voimalaitoskattilassa pääosin sen hävittämissyistä eikä niinkään energiantuotannollisien syiden vuoksi. Puunjalostusteollisuudessa sivutuotteena syntyvä kuoren osuus on merkittävä voimalaitoksien kannalta myös sen ongelmallisten ominaisuuksien vuoksi, sillä sen laatu on hyvin epähomogeenistä ja se tuottaa ongelmia käsittelylaitteistoihin suuren palakoon vuoksi. Laatu ja poltto-ominaisuuksia voidaan parantaa merkittävästi mm. puristamalla, kuivaamalla tai sekoittamalla kuorta muiden poltto-aineiden joukkoon. (Alakangas 2000, s. 66.)

Taulukko 2.3. Kantojen ja kuoren eri osien tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg (Nurmi 1997).

| Puulaji | Juuren puuaines | Juuren kuori | Koko juuri | Kanto | Kanto ja juuri |
|-------------|-----------------|--------------|------------|-------|----------------|
| Mänty | 19,32 | 20,43 | 19,51 | 22,36 | 21,02 |
| Kuusi | 19,33 | 19,55 | 19,38 | 19,18 | 19,32 |
| Hieskoivu | 18,60 | 19,65 | 18,84 | 18,61 | |
| Rauduskoivu | 18,50 | 20,18 | 18,97 | 18,50 | |
| Harmaaleppä | 18,83 | 20,38 | 19,28 | 19,27 | |
| Tervaleppä | 18,93 | 19,66 | 19,17 | 18,91 | |
| Haapa | 18,30 | 19,73 | 18,78 | 18,32 | |

Kannoista tehtävän hakkeen käyttö on lisääntynyt merkittävästi viimeisten vuosien aikana sen saatavuuden ja hyvän lämpöarvon johdosta. Kannot ovat sitkeitä hakettaa, joten tyypillisesti ne murskataan. Kantohakkeen kosteus on noin 35 % ja tuhkapitoisuus voi olla jopa 13 %, jos maa-ainesta on merkittävästi. Kantohakkeen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineelle on 19,3 MJ/kg. Taulukossa 2.3. on esitetty kannon ja kuoren tyypillisiä tehollisia lämpöarvoja kuiva-aineessa. (Alakangas 2000, s. 66.)

Kantojen epäpuhtaudet ovat voimalaitosten kannalta haastavia. Kantojen mukana tulevat epäpuhtaudet - hiekka, multa ja kivet kuluttavat voimalaitosten laitteita sekä sitovat merkittävästi kosteutta. Kantojen laadun parantamiseen, murskaukseen ja epäpuhtauksien seulontaan on kiinnitetty huomiota eri tutkimuksissa, joiden tulokset vaikuttavat lupaavilta.

3 POLTTOAINEIDEN LAADUNMITTAUS

Kiinteiden polttoaineiden laadunmittaus ja sen mukainen energiasisällön määrittäminen ovat perusteena polttoainekaupalle. Näytteenotolla on merkittävä vaikutus voimalaitoksen kattilan lämpöhyötysuhteeseen ja näin sen kannattavuuteen. Nykypäivän haasteita voimalaitoksen kannalta ovat mittaustekniikka ja -tarkkuus, joilla kosteus määritetään sekä laadun vaihtelut yksittäisen energiakuorman sisällä.

3.1 Näytteenotto

Näytteenotolla tarkoitetaan polttoaine-erästä otettavaa pienempää analysoitavaksi soveltuvaa näytettä, jota voidaan pitää ominaisuuksiltaan samanlaisena kuin alkuperäistä kokonaisuutta. Näytteenotolla on suurin vaikutus epätarkkuuteen polttoaineiden laatua määritettäessä. Tämän vuoksi sen suoritus on tehtävä järjestelmällisesti ja huolellisesti, jotta päästään mahdollisimman tarkkaan lopputulokseen. (Alakangas & Impola 2013, ss. 28 - 29.)

Edustava näytteenotto tarkoittaa systemaattisten ja satunnaisvirheiden pienentämistä polttoaineen laatua arvioitaessa. Hyvältä näytteenotolta vaaditaan koko polttoaine-erää edustava näyte, siten että jokaisella partikkelilla kuormassa on yhtä suuri todennäköisyys päätyä näytteeseen. Tällainen näytteenotto vaatii voimalaitokselta tarkan näytteenottosuunnitelman, joka toimii perustana polttoainekauppaa tehtäessä. Tällöin sekä polttoaineen toimittajan, että voimalaitoksen on hyväksyvä toimitussopimusta tehtäessä näytteenotossa käytettävät menetelmät. (Alakangas & Impola 2013, s. 28.)

Polttoainetoimituksissa ja laadunmittauksessa ensisijaisena näytteenottopaikkana toimii polttoaineen luovutuspaikka eli kuorman purkupaikka, josta yksittäinen polttoainenäyte kerätään. Näytteenotto voidaan suorittaa joko purun aikana putoavasta polttoainevirrasta tai heti purun jälkeen kuljettimelta. Edustavin ja luotettavin näyte saadaan putoavasta polttoainevirrasta. Tutkimusten perusteella suositeltavin järjestys yksittäiselle näytteenotolle on seuraava:

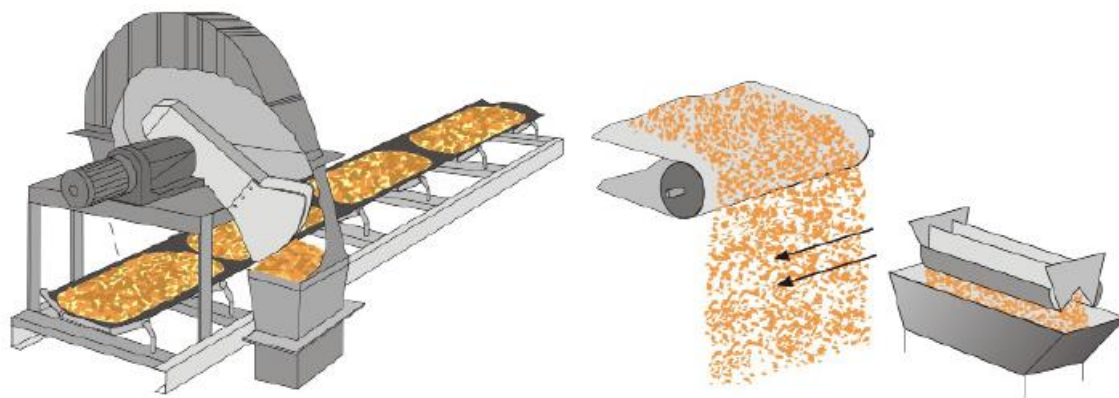
- Liikkuva ja jatkuva polttoainevirta vastaanottoasemalla tai kuormausvaiheessa terminaalilla
- Kuormasta koneellisesti läpiporaavalla näytteenottimella
- Kuormaa purettaessa tai heti purun jälkeen vastaanottoasemalla
- Kuormausvaiheessa kuormaajan kauhasta tai kasasta
- Näytteenottoa ei suositella suuresta puupolttoainevarastosta tai –aumasta

Tarkimpaan tulokseen päästään, kun näytteet otetaan koneellisesti putoavasta, liikkuvasta polttoainevirrasta. Puupolttoaineiden epähomogeenisuudesta johtuen on yksit-

täisen näytteen edustavuus kuormatasolla hyvin pieni varsinkin, jos näytteenotto suoritetaan paikallaan olevasta lajittuneesta polttoaineesta. (Alakangas & Impola 2013, ss. 28 - 29.)

3.1.1 Koneellinen näytteenotto

Koneellisella näytteenotolla tarkoitetaan automatisoitua näytteenottoa suoraan polttoainekuljettimelta tai putoavasta polttoainevirrasta. Näytteenotto pyritään suorittamaan polttoainevirrasta ottamalla yksittäisiä näytteitä keskiarvoperiaatteella suoraan kuljettimelta tai putoavasta polttoainevirrasta kuvan 3.1. mukaisesti. Muita vaihtoehtoisia menetelmiä koneelliseen näytteenottoon on monia, mutta yleisesti se pyritään toteuttamaan siten, että koko polttoainevirta tulee leikatuksi. Varsinkin epäjatkuvista polttoainevirroista, kuten kola- tai ruuvikuljettimilta tulee kiinnittää huomiota siihen, että näyte otetaan koko virran leveydeltä. (Alakangas & Impola 2013, s. 30.)



Kuva 3.1. Vasemmalla hihnan poikki ja oikealla putoavasta virrasta ottava näytteenotin (Alakangas & Impola 2013, s. 30).

Näytteenottopaikkaa valittaessa tulee huomioida, että eri kuormien ja toimittajien polttoaineet ovat erillään eivätkä sekoitu näytettä otettaessa. Näytteenottoväli tulee myös huomioida ja mitoittaa siten, että suunniteltu näytemäärä tulee täytetyksi ja yksittäisnäytteet levittäytyvät edustavasti yli koko kuorman. Näytteenottimen suuaukon on oltava vähintään 2,5 kertaa polttoaineen nimellispalakoosta. (Alakangas & Impola 2013, s. 30.)

Automaattijärjestelmiin perustuvassa näytteenotossa yksittäiset näytteet kerätään toimittajakohtaisiin keräilyastioihin, joista sekoitetaan vuorokausikohtainen kokoomanäyte laboratorioon analysointia varten. Laitoksen on myös varmistuttava siitä, että näytteenotin ja käsittelylaitteet puhdistuvat eri toimittajien ja polttoainelaatujen vaihdella sekä siitä, että kokoomanäytteeseen päätyy myös polttoaineen sisältämää hienoaainesta ja suurempia kappaleita. Koneellista näytteenottoa käytettäessä, on sen luotettavuus testattava systemaattisten virheiden poistamiseksi sekä eri osapuolten hyväksyttävä sen käyttö polttoaineen hinnoittelun perustana. (Alakangas & Impola 2013, ss. 30 - 31.)

3.1.2 Manuaalinen näytteenotto

Manuaalisella näytteenotolla tarkoitetaan käsin tapahtuvaa näytteenottoa polttoainekuormasta laadun ja hinnoittelun perustaksi. Yksittäiset näytteet otetaan suoraan joko kuorman purkamisen yhteydessä putoavasta polttoainevirrasta tai heti purkamisen jälkeen polttoainekasasta, vastaanottotaskusta tai polttoainekentältä. Manuaalinen näytteenotto on myös mahdollista järjestää samoin kuin koneellinenkin näytteenotto, suoraan kuljettimilta, mutta on huomattavan työlästä jatkuvana käytäntönä. Kuten koneellisessa, niin myös manuaalisessa näytteenotossa tulee näytteenottimen suuaukon olla vähintään 2,5 kertaa nimellistä suurinta palakokoa suurempi ja siinä on käytettävä kuvan 3.2. mukaista pitkävartista näytteenotinta. On myös varmistuttava, että näytteenottokauha on riittävän puhdas. (Alakangas & Impola 2013, s. 31.)



Kuva 3.2. Pitkävartinen näytteenotin polttoainekasasta tapahtuvaan näytteenottoon (Alakangas & Impola 2013, s. 32).

Käsinäytettä otettaessa kuormasta putoavasta polttoainevirrasta, tulee näytteenottovälin olla riittävän suuri siten, että yksittäisiä näytteitä saadaan tasaisesti kuorman eri osista ja leveyksiltä kokoomanäytteeseen. Näytettä otettaessa perästä purkavasta autosta on pyrittävä välttämään näytteenottoa ensimmäisistä ja viimeisistä osista kuormaa. Vastaanottotaskusta näytettä otettaessa on varmistuttava, että näytteenotto kohdistuu tasaisesti ympäri kuormaa ja sen eri osia. (Alakangas & Impola 2013, s. 32.)

Kuorman purun tapahtuessa polttoainekentälle on näytteenotto mahdollista edellä kuvatulla tavalla. Jossain tapauksissa tämän kaltainen järjestely ei ole mahdollista, jolloin näyte joudutaan ottamaan kuorman purun jälkeen. Tällöin on varmistuttava siitä, että se otettava kuormakohtaisesta kasasta, jossa se ei ole vielä sekoittunut muiden polt-

toaineiden kanssa. Näytteet otetaan puretun kuorman eri osista kuvan 3.2. mukaisella pitkävartisella näytteenottimella eri osista kasaa mahdollisimman tasaisesti. Kentälle purettaessa polttoainejakeet lajittuvat poikkeuksetta kasan eri osiin, joka on tärkeää huomioida näytettä otettaessa. Kuvassa 3.3. on esitetty näytteenottopisteen kasasta tasaisesti korkeus- ja pituussuunnassa. Näytteenotossa pyritään myös välttämään kasan pinnasta otettavia näytteitä. (Alakangas & Impola 2013, s. 32.)



Kuva 3.3. Näytteenottopisteet polttoainekasasta (Alakangas & Impola 2013, s. 33).

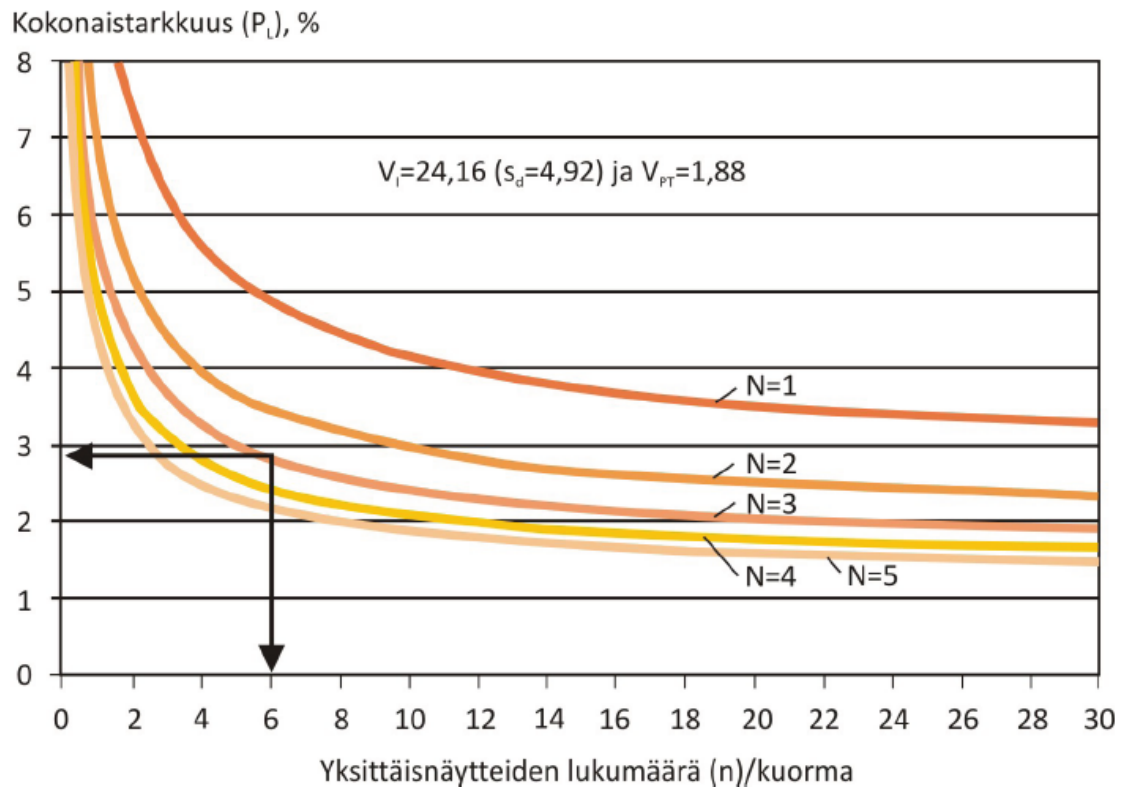
Manuaalinen näytteenotto on yleisesti käytössä vielä useissa voimalaitoksissa. Tärkeää on pyrkiä ottamaan näytteet mahdollisimman systemaattisesti ja tasaisesti eri puolilta kuormaa. Näytteenottaja ei saa tehdä valintoja palakoon tai epäpuhtauksien suhteen, vaan näytteen tulee olla edustava kuormakohtaiseen kokoomanäytteeseen. (Alakangas & Impola 2013, s. 33.)

3.2 Näytteiden lukumäärä ja tilavuus

Yksittäisten näytteiden lukumäärään vaikuttaa polttoaineen laadulliset tekijät kuormassa. Kosteuden vaihtelut varsinkin epähomogeenisissä hakkuutähde- ja kokopuuhakkeissa voivat olla hyvinkin suuria kuorman sisällä, jolloin näytteiden määrää tulisi lisätä virheiden pienentämiseksi. Polttoainelajin vaikutus kosteushajontaan kuorman sisällä on suurin yksittäinen tekijä virheisiin, mutta myös kuorman täyttötavalla voi olla vaikutusta. Kuormasta otettavien yksittäisten näytteiden lukumäärä voidaan laskea yhtälöstä (1) vaaditun tarkkuuden saamiseksi, joka on esitetty näytteenottostandardissa. Kuvassa 3.4. on esitetty yksittäisnäytteiden lukumäärän riippuvuus kokonaistarkkuudesta, kun arvot on laskettu hakkuutähdehakkeelle vuodenaikojen keskimääräisellä hajonnalla (Alakangas & Impola 2013, s. 55).

$$n = \frac{4V_l}{NP_L^2 - 4V_{PT}} \quad (1)$$

missä n on yksittäisnäytteiden pienin lukumäärä
 P_L on haluttu kokonaistarkkuus 95 %:n tilastollisella luottamustasolla
 V_l on primäärinen yksittäisnäytteiden välinen varianssi
 N on toimituserän kuormien lukumäärä
 V_{PT} on esikäsittelyn ja määrittelyn varianssi. (Alakangas & Impola 2013, s. 33.)



Kuva 3.4. Yksittäisnäytteiden lukumäärän riippuvuus kokonaistarkkuudesta (Alakangas & Impola 2013, s. 55).

Näytteenoton tapahtuessa jokaisesta polttoainekuormasta jatkuvatoimisessa toimituksessa, on yksittäisiä polttoainenäytteitä otettava kuormasta vähintään 2 kappaletta jokaista 50 irto- m^3 kohden. Toimituksen tapahtuessa erikokoisilla kuormatiloilla on yksittäisnäytteiden vähimmäismäärät taulukon 3.1. mukaiset, jolloin 3 - 5 kuorman toimituserässä on mahdollisuus päästä noin ± 3 prosenttiyksikön tarkkuuteen ja yli kuuden kuorman erissä ± 2 prosenttiyksikköön. Suomessa metsäpolttoaineissa esiintyvät kuormakohtaiset vaihtelut ovat hyvin suuria, jolloin alle 200 irto- m^3 toimituserillä on syytä lisätä näytteiden määrää vähintään kaksinkertaiseksi. Tällöin voidaan saavuttaa ± 4 prosenttiyksikön tarkkuus kosteuden määrittämisessä Suomen olosuhteissa. (Alakangas & Impola 2013, s. 34.)

Taulukko 3.1. Yksittäisnäytteiden vähimmäismäärät kuormittain (Alakangas & Impola 2013, s. 34).

| Toimitustapa | Näytteiden lukumäärä (kpl) |
|--|--|
| Kuorma-auto (nuppi) | vähintään 2 |
| Puoliperävaunu (<100 m ³) | vähintään 4 |
| Yhdistelmä (100 - 160 m ³) | vähintään 6 (2 nupista + 4 perävaunusta) |
| Konttiyhdistelmät | vähintään 2 per kontti |

Yksittäisnäytteen tilavuus voidaan määrittää näytteenottostandardin mukaisesti kiinteälle biopolttoaineelle yhtälöllä (2). Vähimmäistilavuus riippuu polttoainepartikkelien läpimitasta ja pyöreäaukkoisen seulan koosta, jonka on läpäistävä vähintään 95 % toimitetun polttoaine-erän kokonaismassasta. Suomessa metsäpolttoaineiden toimituserissä keskimääräinen palakoko on systemaattisesti suurimpi kuin 10 mm, joten voidaan käyttää yksittäisnäytteen tilavuuden laskemisessa yhtälön (2) alempaa kaavaa. Tyypillisesti metsäpolttoaineista otetaan noin 3 - 5 litran suuruinen näyte. (Alakangas & Impola 2013, s. 34.)

$$\begin{cases} Vol_{incr} = 0,5 & kun d_{95} < 10 \\ Vol_{incr} = 0,05 \times d_{95} & kun d_{95} \geq 10 \end{cases} \quad (2)$$

missä Vol_{incr} on yksittäisnäytteen vähimmäistilavuus (l)

d_{95} on nimellisesti suurin palakoko, jonka vähintään 95 % toimitetun erän massasta läpäisee (mm). (Alakangas & Impola 2013, s. 34.)

Koneellisen näytteenoton luotettavasta toiminnasta ja edustavuudesta on syytä suorittaa erillinen mittaus, jonka jokainen osapuoli hyväksyy polttoainetoimitussopimusta tehtäessä. Erillisessä mittauksessa on syytä kiinnittää huomiota automatisoidun näytteen kokoon, sillä helposti koneellisessa näytteenotossa näytettä kertyy ylimäärin. Tällöin osa näytteestä palautetaan takaisin syöttölinjalle, jotta päästään näytteen koossa lähelle käsinäytteen kokoa, mikä voi taas osittain aiheuttaa mittavirhettä erän arvoja määritettäessä. (Alakangas & Impola 2013, s. 35.)

3.3 Näytteiden analysointi

Näytteenottostandardissa on määritetty eri menetelmiä, joiden avulla kokoomanäytteet voidaan jakaa laboratorio- ja analyysinäytteiksi. Luotettaviin tuloksiin päästään, kun

- näytteen koostumus ei muutu alkuperäisestä eri käsittelyvaiheiden aikana.
- kokoomanäytteen sekoituksessa ollaan huolellisia, jotta kaikki jakeet tulee huomioitua analysoitavaan näytteeseen.
- murskauksen ja jauhamisen yhteydessä pyritään välttämään kosteuden muutoksia ja hienoaineshäviöitä.
- vältetään näytteen lämpenemistä ja kuivumista käsittelyn ja varastoinnin aikana.

- näytteenotto- ja käsittelylaitteet sekä –menetelmät ovat yhteisesti sovittu toimitussopimuksessa.

Kokoomanäytteestä määritetään toimitetulleille polttoaineille ominaisuudet polttoainekaupankäyntiin hinnan muodostamiseksi, mutta sen on tarkoitus toimia myös päästökaupankäyntiä ajatellen. Kokoomanäytteistä määritetään toimittajakohtaisesti polttoainelajeittain ja tarvittaessa toimituskohteittain kosteus sekä tarvittaessa kuiva-aineen ominaisuuksista tuhka ja lämpöarvo. Näytteen ominaisuuksien analysointi tulee suorittaa tietyn ajanjakson aikana, jonka pituus on kosteuden osalta vuorokausi ja kuiva-aineen ominaisuuksien määrittämisessä enintään yksi kuukausi. (Alakangas & Impola 2013, s. 35.)

Kokoomanäytteiden ja laboratorionäytteiden muodostamiseen yksittäisnäytteistä on määritelty näytteenottostandardissa menetelmät, joita voidaan soveltaa seuraavilla tavoilla:

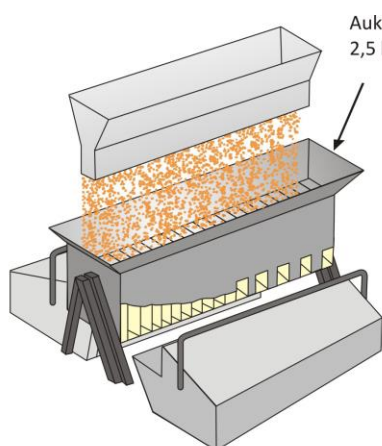
- Yksittäisnäytteet laitetaan yhteen astiaan toimituseräkohtaisesti muodostaen kokoomanäytteen, joka lähetetään laboratorioon näytteen valmistamiseen.
- Yksittäisnäytteet sekoitetaan kokoomanäytteeksi, josta muodostetaan laboratorionäyte sekoituksen ja jakamisen jälkeen.
- Yksittäisnäytteet lähetetään laboratorioon erillisissä astioissa tai pusseissa, jossa ne yhdistetään kokoomanäytteeksi.

Suurien toimituserien toimittajakohtaiset ja polttoainelajikohtaiset näytteet kerätään isoon kokoomanäyteastiaan, josta sekoitetaan vuorokausikohtainen näyte kosteusmäärittäykseen. Pienissä toimituserissä näytteet voidaan ottaa omiin astioihin tai pusseihin kosteusmäärittäystä varten. Näytteet tulee säilöä ilmatiiviisti, jottei kosteus pääse muuttumaan säilytyksen aikana. (Alakangas & Impola 2013, s. 36.)

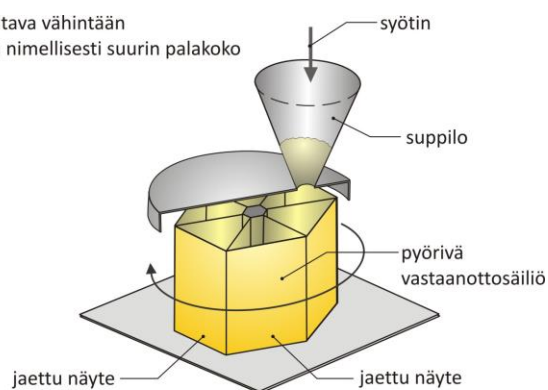
3.4 Näytteiden käsittely

Kiinteistä polttoaineista muodostettavat kokoomanäytteet jaetaan laboratorionäytteiksi, joiden tilavuus on vähintään kaksi litraa. Kosteusmäärittäminen tulee tehdä vähintään 300 g:sta kosteaa näytettä kosteusstandardin mukaisesti. Lämpöarvon, tuhkapitoisuuden ja kosteuden määrittäystä varten vaaditaan vähintään 500 g:n näyte.

Kokoomanäytteiden jakaminen tulee suorittaa neliöinti- ja kasamenetelmillä, jotka ovat määritetty näytteenottostandardissa. Oleellista on näytteiden huolellinen sekoittaminen ja jakaminen. Kuvassa 3.5. on esitetty standardin mukaiset näytteiden jakolaitteet. Mikäli jakolaitteita ei ole käytössä, voidaan näytteet jakaa myös mekaanisesti kuvan 3.6. neliöimismenetelmän mukaisesti. Tällöin näyte tulee sekoittaa erityisen huolellisesti pohjaa myöten. (Alakangas & Impola 2013, s. 37.)

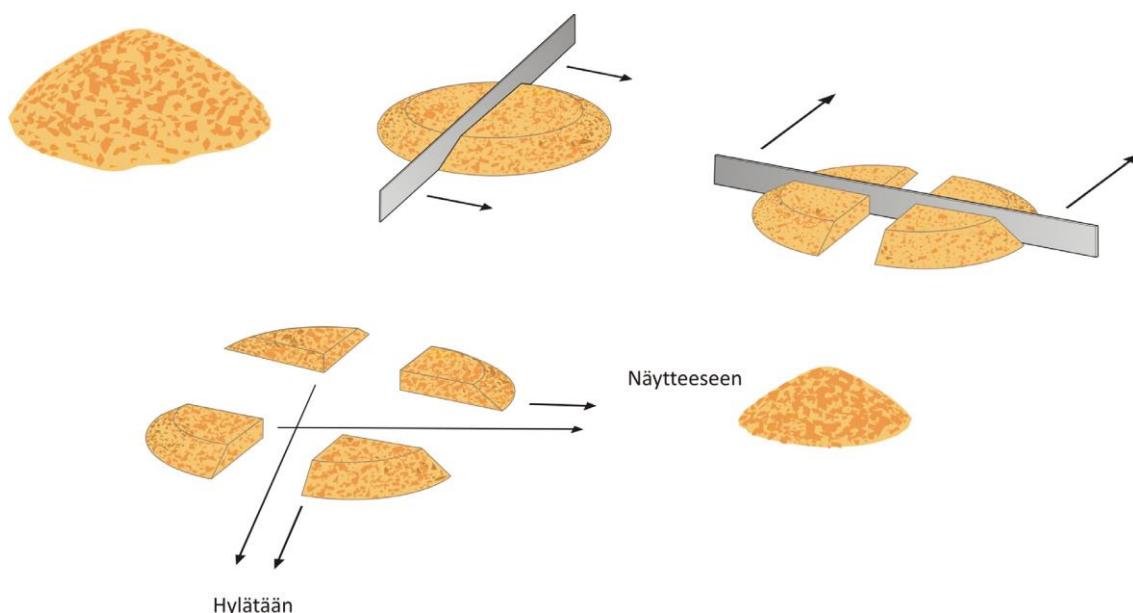


Esimerkki lokeroidusta laatikkojakajasta



Esimerkki pyörivästä jakolaitteesta

Kuva 3.5. Lokeroitu laatikkojakaja ja pyörivä jakolaitte (Alakangas & Impola 2013, s. 37).



Kuva 3.6. Kokoomanäytteen jakaminen analysointia varten neliöimismenetelmällä (Alakangas & Impola 2013, s. 38).

Kokoomanäytteiden tilavuuden kasvaessa, sekoitukseen on hyvä käyttää erillistä sekoitinta tai esimerkiksi betonimyllyä. Kaikkien käsittelyvaiheiden aikana on tärkeää huolehtia jokaisen partikkelikoon yhtä suuresta todennäköisyydestä päätyä analysointiin. Lajittumista tapahtuu erityisesti suurien ja pienien partikkelien osalta. (Alakangas & Impola 2013, s. 38.)

3.5 Laadunmittausta koskevat säädökset

Puutavaran mittauksessa sovelletaan lakia (414/2013) jalostamattoman puutavaran luovutuksen-, työn- ja urakoinninmittauksessa, joka pitää sisällään runkopuusta, kuoresta, oksista, kannoista ja juurista valmistetut puutavaralajit. Lain mukaan sallitut käsittelytavat ovat: katkonta, haketus ja murskaus. Puutavaran mittausta koskeva laki tuli voimaan

1.7.2013 ja sitä sovelletaan energiapuutavaralajien mittaukseen 1.1.2014 alkaen ja energiapuun toimitussopimuksiin ja niiden mukaisiin mittauksiin 1.7.2014 alkaen. (Finlex 2013.)

Lain mukaan lopullinen mittaustulos annetaan tilavuuden, painon tai kappalemäärän yksiköinä, jolloin kiintotilavuuden, irtotilavuuden, painon tai kuivapainon määrittäminen ja niihin käytettävien mittausten menetelmien mukaan myös kosteus määrittäminen kuuluu lain piiriin. Energiasisällön tai lämpöarvon määrittäminen eivät kuulu laissa sovellettaviin mittauksiin. (Finlex 2013; Alakangas & Impola 2013, s. 39.)

Puutavaran mittauslaissa on määritetty säännökset mittauksen tekemiseen liittyvistä sopimuksista – kuka tekee mittaukset, miten tulosten luotettavuus varmistetaan, mitä menetelmiä ja laitteita mittauksessa käytetään ja mitkä ovat niiden vaatimukset, miten mittaukset dokumentoidaan sekä miten mittaustuloksista ilmoitetaan mittausosapuolille. Lisäksi laki sisältää valvonnan, mittauksen kehittämisen, erimielisyyksien ratkaisemisen sekä muutoksenhaun organisaatiot ja menettelyt. (Finlex 2013; Alakangas & Impola 2013, s. 39.)

Maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa (12/13) on säädetty puutavaran mittausmenetelmien periaatteet ja sisällöt, luotettavuuden varmistamiseen käytettävät menetelmät sekä suurimmat sallitut poikkeamat mittauksissa ja yleiset vaatimukset mittauslaitteiden osalta. Laissa sovelletaan kuorman punnitsemista automaattisilla vaa'illa. Ei-automattivaa'at soveltuvat yleistä mittauksiin liittyvää mittauslaitelakia (707/2011). (Finlex 2013; Alakangas & Impola 2013, s. 39.)

4 POLTTOAINEIDEN LAADUNMÄÄRITYS

4.1 Polttoaineiden määrittäminen

Polttoaineiden laadunmäärittämenetelmiä on kehitetty Suomessa sekä kiinteille että nestemäisille polttoaineille, joiden pohjana on käytetty kansainvälisiä mittausten menetelmiä. Polttoaineiden ominaisuuksien määrittämisessä tärkeintä on tehdä niille teknillinen analyysi, selvittää alkuaine koostumus, lämpöarvo sekä tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Tietoa tarvitaan myös polttoaineen palakoosta, tiheydestä sekä muista käsittelyteknisistä ominaisuuksista. Ympäristöön ja polttoteknisiin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat polttoaineissa esiintyvät raskasmetallipitoisuudet sekä erilaisten metallien ja epämetallien pitoisuudet, jotka voidaan määrittää joko polttoaineesta tai tuhkasta. Itsesytymislämpötila sekä pölyräjähdysominaisuudet, ovat hienojakoisten polttoaineiden ominaisuuksia, jotka vaikuttavat turvallisuuteen liittyviin tekijöihin. (Alakangas 2000, 26.)

Polttoaineiden teknillinen analyysi tarkoittaa kosteuden, haihtuvien aineiden, kiinteän hiilen sekä tuhkan määrittämistä (Alakangas 2000, s. 26). Teknillistä analyysiä käytetään nykyään osittain perustana kiinteiden polttoaineiden kaupassa laatua arvioitaessa. Laadun arvioinnissa otetaan huomioon polttoaineen kosteus ja lämpöarvo. Tässä työssä pyritään ottamaan huomioon myös muut polttoaineen laatuun vaikuttavat tekijät kaupahintaa arvioitaessa.

4.2 Kosteuden määrittäminen

Kotimaisten polttoaineiden kosteuden määrittäminen perustuu ISO 589 – menetelmään. Polttoaineen kosteus määritetään käytettävistä polttoaineista otetuista näytteistä. Näytteen koko määräytyy punnitustarkkuuden perusteella. Punnitustarkkuuden ollessa 0,01 g, punnitaan vähintään kaksi 30 - 100 g suuruista näytettä, kun taas tarkkuuden ollessa 0,1 g, punnitaan kaksi 200 - 400 g suuruista näytettä. (Alakangas 2000, s. 26.)

Punnittu näyte kuivataan ilmastoidussa lämpökaapissa, jonka lämpötila pidetään 105 ± 2 °C asteessa. Kuivausajaksi riittää noin 16 tuntia, kun näyte kerroksen paksuus on enintään 30 mm, mutta kuivausaika ei saa olla yli 24 tuntia. Ennestään kuivatut näytteet on poistettava kaapista ennen kuin kosteat näytteet voidaan laittaa kuivumaan. Kuivauksen jälkeen näytteet on punnittava kuumana välittömästi, kun ne otetaan lämpökaapista. Kuivauksessa käytettävien astioiden on kestävä kuivauslämpötila ja ne eivät saa imeä kosteutta itseensä. Polttoaineen kosteus voidaan laskea kuivauksessa tapahtuvasta massan muutoksesta yhtälöllä (3)

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

missä M_{ar} on märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)

m_1 on märän näytteen massa (g)

m_2 on kuivatun näytteen massa (g). (Alakangas 2000, s. 27.)

4.3 Lämpöarvon määrittäminen

Polttoaineille voidaan laskea stökiometrisen palamisreaktion synnyttämä reaktioentalpia, jota kutsutaan polttoaineen lämpöarvoksi. Polttoaineiden lämpöarvoille löytyy useita korrelaatioita kirjallisuudesta, jotka voivat kuitenkin poiketa huomattavasti mittatuista arvoista. (Raiko et al. 2002, s. 52; Pitkänen 2013, s. 5.)

Kiinteiden polttoaineiden lämpöarvo saadaan selville ainoastaan mittaamalla kalorimetrinen lämpöarvo eli ns. ylempi lämpöarvo kalorimetripommissa (Alakangas 2000, s. 27). Kiinteät polttoaineet sisältävät yleensä happea, joka voi muodostaa erilaisia yhdisteitä palavien komponenttien kanssa. Tästä syystä kiinteiden polttoaineiden lämpöarvoa on vaikea selvittää alkuainekoostumuksen perusteella, koska ei tiedetä tarkasta hapen yhdisteitä polttoaineessa (Raiko et al. 2002, s. 52). Suomessa polttoaineiden lämpöarvo ilmoitetaan yleensä tehollisena lämpöarvona eli ns. alempana lämpöarvona, jossa otetaan huomioon vedyn palamisen synnyttämä ja savukaasuissa poistuvan vesihöyryn haihduttamiseen kuluva lämpömäärä (Alakangas 2000, s. 27). Polttoaineen palamisen yhteydessä syntyvä todellinen lämpömäärä saadaan laskettua tehollisesta lämpöarvosta polttoaineen toimituskosteudessa eli saapumistilassa.

4.3.1 Kalorimetrinen lämpöarvo

Kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo saadaan polttamalla polttoaineesta otettu näyte pommikalorimetrissä. Ilmakuivatusta näytteestä otetaan noin 1 g painoinen erä, joka poltetaan nesteeseen upotussa pommikalorimetrissä happiatmosfäärissä ja mitataan näin vapautuva energiamäärä. Samasta polttoainenäytteestä mitataan kosteus, jonka avulla ilmakeiuvan näytteen lämpöarvo saadaan muunnettua vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Tällöin palamisessa syntyvä vesi on nesteinä, joten näin saatu lämpöarvo on liian korkea normaalipoltton synnyttämään lämpömäärään verrattuna. Polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvon laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä (4)

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (4)$$

missä $Q_{gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{gr,ad}$ on analyysikostean (ilmakuivan) näytteen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)

M_{ad} on näytteen (ilmakuivan) analyysikosteus (%). (Alakangas 2000, s. 28; Pitkänen 2013, s. 5.)

4.3.2 Tehollinen lämpöarvo

Tehollinen eli alempi lämpöarvo määritetään siten, että palamisen seurauksena syntynyt vesi on höyryfaasissa (Pitkänen 2013, s. 5). Tällöin absoluuttisen kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo saadaan laskettua yhtälöllä (5), vähentämällä kalorimetrisestä lämpöarvosta kuiva-aineen vedyn palamisessa syntyvän vesimäärän höyrystämiseen vaadittava lämpömäärä

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 0,02441 \times M \quad (5)$$

missä $Q_{net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{gr,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg)

0,02441 (MJ/kg) on veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä (+25 °C)

M on polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palaessa syntynyt vesimäärä painoprosentteina. (Alakangas 2000, s. 29.)

4.3.3 Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo

Polttoaineen todellinen lämpöarvo eli saapumistilassa olevan polttoaineen lämpöarvo saadaan laskettua kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta vähentämällä siitä polttoaineen sisältämän veden höyrystämiseen vaadittava lämpömäärä. Näin saatua lämpöarvoa voidaan käyttää laskusovellutuksissa. Yhtälössä (6) on esitetty kalorimetripommissa määritetyn kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo

$$Q_{net,ar} = Q_{net,d} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02441 \times M_{ar} \quad (6)$$

missä $Q_{net,ar}$ on saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{net,d}$ on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

M_{ar} on polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa (%)

0,02441 (MJ/kg) on veden höyrystämiseen kuluva lämpömäärä (+25 °C). (Alakangas 2000, 29.)

4.4 Polttoaineen energiatiheys saapumistilassa

Saapumistilassa polttoaineelle voidaan määrittää yhtälöllä (7) energiatiheys, joka kertoo polttoainekuutiota kohti saatavan MWh määrän

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} \times Q_{net,ar} \times D_{ar} \quad (7)$$

missä E_{ar} on kostean polttoaineen energiatiheys (MWh/i-m³)

$Q_{net,ar}$ on kostean polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg)

D_{ar} on kostean polttoaineen irtotiheys eli tilavuuspaino (kg/i-m³)

$\frac{1}{3600}$ on energiayksikön muuntokerroin (MWh/MJ). (Alakangas 2000, s. 30.)

4.5 Toimitetun kuorman energiamäärä

Voimalaitokselle toimitetutusta polttoainekuormasta voidaan määrittää kokonaisenergiämäärä, joka saadaan, kun kuorma poltetaan kattilassa. Toimitetun kuorman energiamäärä voidaan laskea yhtälöllä (8)

$$W = \frac{Q_{net,ar}}{3,6} \times m \quad (8)$$

missä $\frac{Q_{net,ar}}{3,6}$ on kostean polttoaineen lämpöarvon (MJ/kg) muunto yksikköön MWh/t
 m on toimitetun polttoaine kuorman massa (tonnia). (Alakangas 2000, s. 30.)

4.6 Tuhkapitoisuus

Polttoaineen tuhkaksi luetaan polttoaineen mukana tuleva inerttiaines, joka ei reagoi palaessa vaan poistuu pedistä pohjatuhkan mukana tai lähtee savukaasujen mukana kattilan kakkosvetoon. Polttoaineen palaessa inerttiä ainesta muodostuu palamisen seurauksena kuiva-aineessa tulevasta tuhkasta sekä polttoaineiden mukana tulevasta kivistä, hiekasta sekä vierasesineistä. Polttoaineiden kuiva-aineille tyypillistä on, että ne sisältävät tietyn määrän tuhkaa, joka voidaan määrittää polttoainekohtaisesti.

Polttoaineen kuiva-aineelle voidaan määrittää tuhkapitoisuus polttamalla polttoainenäytettä uunissa nostoen lämpötilaa vähitellen noin 815 ± 15 °C:een, jolloin näytteestä haihtuu pois palavat ainesosat. Näytteen tuhkapitoisuus voidaan laskea yhtälön (9) avulla, kun tunnetaan polttoainenäytteen alkupaino, polton jälkeinen loppupaino sekä polttoainenäytteen kosteus

$$A_d = \frac{m_2 \times 100}{m_1} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (9)$$

missä A_d on kuiva-aineen tuhkapitoisuus (%)
 m_1 on kostean polttoainenäytteen massa (g)
 m_2 on polttojäännöksen massa (g)
 M_{ad} on polttoainenäytteen analyysikosteus (%). (Alakangas 2000, ss. 30 - 31.)

Eri puupolttoaineille on määritetty tyypilliset tuhkapitoisuudet kuiva-aineessa, jotka ovat esitettynä taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Puun tuhkapitoisuus (Wilén et al. 1996).

| Puupolttoainelaji | Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, p-% |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| Kokopuuhake, mänty / sekapuu | 0,6 / 0,5 |
| Koivuhake | 0,4 – 0,6 |
| Hakkuutähdehake | 1,33 |
| Hakkuutähdehake, kuusi | 2,0 – 6,0 |
| Kantohake | 0,50 |
| Pajuhake | 1,7 |
| Sahanpuru, mänty, kuorineen/kuoreton | 1,1 / 0,08 |
| Kutterinlastu | 0,40 |
| Männyn kuori | 1,70 |
| Kuusen kuori | 2,34 / 2,8 |
| Koivun kuori | 1,60 |

Työssä ei tulla erikseen määrittämään kuiva-aineiden sisältämiä tuhkamääriä, vaan keskitytään pääosin määrittämään polttoaineiden mukana tulevat muut inertit aineet, kuten hiekka, kivet sekä vierasesineet. Näiden pitoisuuksia kuormasta on hyvin vaikea selvittää nykyisillä mittausmenetelmillä ja aiemmin seulonta onkin ollut käytännössä ainut keino, jolla pystytään saamaan suuntaa antavia tuloksia. Tässä työssä niiden pitoisuudet pyritään selvittämään röntgenmittalaitteiston avulla, joka mittaa inerttien aineiden pitoisuudet koko kuormasta. Lisäksi pedistä poistettavan tuhkan määrä tullaan määrittämään punnitsemalla tuhkalavalle mittausten aikana kertynyt tuhka.

5 PALAMISEN TERMODYNAMIKKA

Polttoprosessin ymmärtämiseksi on tärkeä tuntee palamisen termodynaamiset perusteet. Teoreettisen tarkastelun keskeisimpinä asioina on pyrkiä aluksi selvittämään prosessiin osallistuvien aineiden määrät, koostumukset sekä siirtyvät energiamäärät. Yleisesti polttoprosessit tapahtuvat korkeassa lämpötilassa matalan paineen vallitessa, jolloin kaasufaasin ainevirrat noudattavat kineettistä kaasuteoriaa. Palamisen aikana lähtöaineet reagoivat vapauttaen energiaa, joka saa usein aikaan voimakkaan lämpötilan nousun systeemissä. (Raiko et al. 2002, s. 31.)

5.1 Reaktioyhtälö

Yleisesti kemiallisen reaktion yhtälö (10) voidaan määritellä seuraavasti

$$\sum_i \nu_i B_i = 0 \quad (10)$$

missä ν_i on reaktioon osallistuvan aineen i stökiometrinen kerroin
 B_i on aineen i symboli.

Reaktioyhtälössä (10) lähtöaineiden ν_i :t merkataan negatiivisiksi ja reaktiotuotteiden ν_i :t positiivisiksi. Yleisesti reaktioyhtälö kuitenkin kirjoitetaan siten, että lähtöaineet sijoitetaan yhtälössä vasemmalle puolelle ja tuotteet oikealle. (Raiko et al. 2002, s. 31.)

5.2 Palamisen stökiometria

Palamisprosessia tarkasteltaessa voidaan tavallisten polttoaineiden osalta keskittyä viiteen alkuaineeseen: hiileen, vetyyn, happeen, typpeen ja rikkiin, joiden määrillä ja reaktioilla on merkitystä laskennan kannalta. Näitä alkuaineita tarkasteltaessa voidaan määrittää polttoprosessissa tarvittava teoreettinen happi- tai ilmamäärä täydellisen palamisen saattamiseen sekä syntyvät savukaasumäärät ja niiden koostumus. (Raiko et al. 2002, s. 34.)

5.2.1 Palamis- ja kaasutusreaktiot

Palamisprosessin laskennassa on tärkeä tuntee siihen osallistuvan ilman koostumus tarkasti. Prosessiin syötettävän ilman vesihöyryn mooliosuus voidaan laskea yhtälön (11) avulla

$$y_{H_2O} = \frac{p_h}{p_{tot}} \quad (11)$$

missä y_{H_2O} on vesihöyryn mooliosuus

p_h on vesihöyryn osapaine

p_{tot} on kostean ilman paine. (Raiko et al. 2002, s. 34.)

Vesihöyryn osapaine voidaan määrittää kylläisen veden osapaineen ja suhteellisen ilman kosteuden avulla yhtälöllä (12), kun tunnetaan ilman lämpötila

$$\varphi = \frac{p_h}{p'_h} \quad (12)$$

missä φ on suhteellinen ilmankosteus

p_h on vesihöyryn osapaine

p'_h on kylläisen veden höyrynpaine vastaavassa ilman lämpötilassa. (Raiko et al. 2002, s. 34.)

Kylläisen veden höyryn paine saadaan, joko hakemalla suoraan kylläisen veden ja vesihöyryn h,s-piirroksista (Pitkänen 2013, s.11) tai käyttämällä yhtälön (13) polynomisovitetta (Raiko et al. 2002, s. 690.)

$$\log_{10} p'_h = A + \frac{B}{T} + C \log_{10} T + DT^2 + 2,12490 \quad [Pa] \quad (13)$$

missä p'_h on kylläisen veden höyrynpaine vastaavassa ilman lämpötilassa

T on ilman lämpötila (K)

A, B, C, D ja E ovat korrelaatiokertoimet, jotka ovat esitetty eri yhdisteille liitteessä 2, jossa viimeinen sarake on keskimääräinen poikkeama todellisesta arvosta. (Raiko et al. 2002, s. 35.)

Palamisessa vaadittava ilmantarve lasketaan yleisesti ensin kuivalle ilmalle. Todeellinen ilmantarve saadaan laskettua ilmassa olevan vesihöyryn ja kuivan ilmantarpeen mooliosuuksien tai osapaineiden suhteena ideaalikaasun laskusääntöjä käyttämällä yhtälöllä (14)

$$\frac{n_{H_2O}}{n_{ik}} = \frac{p_h}{p_{ik}} = \frac{p_h}{p_{tot} - p_h} = \frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} \quad (14)$$

missä n_{H_2O} on ilman mukana tulevan kosteuden moolimäärä

n_{ik} on kuivan ilman moolimäärä

p_h on vesihöyryn osapaine

p_{ik} on kuivan ilman osapaine

p_{tot} on kostean ilmanpaine

y_{H_2O} on vesihöyryn mooliosuus. (Raiko et al. 2002, s. 35; Pitkänen 2013, s.11.)

Kostean ilman kokonaismäärä saadaan laskettua kuivan ilman ja vesihöyryn ainemäärien summana. Palamisreaktiossa tarvittava happi syötetään ilman mukana, joka sisältää hapen (O_2) lisäksi pääasiassa typpeä (N_2) sekä vähäisiä määriä hiilidioksidia (CO_2) sekä muita kaasuja, kuten argonia (Ar) ja neonia (Ne). Taulukossa 5.1. on esitetty kuivan ilman koostumus ja moolimassa.

Taulukko 5.1. Kuivan ilman koostumus ja moolimassa (Pitkänen 2013, s.11).

| Komponentti | Mooliosuus | Moolimassa (g/mol) | Mooliosuus x moolimassa (g/mol) |
|-------------|------------|-------------------------|---------------------------------|
| N_2 | 0,78084 | 28,0134 | 21,8740 |
| O_2 | 0,20948 | 31,9988 | 6,7031 |
| CO_2 | 0,00032 | 44,010 | 0,0141 |
| Ar | 0,00934 | 39,948 | 0,373 |
| Ne | 0,00002 | 20,179 | 0,0004036 |
| Summa | 1 | $M_{\text{kuiva ilma}}$ | 28,965 |

Palamislaskuissa kuiva ilma voidaan jakaa kahteen erikseen tarkasteltavaan osaan, happeen ja muihin kaasuihin. Muita kaasuja voidaan pitää lähes inerteinä kaasuina, sillä ne eivät osallistu merkittävästi palamisprosesseihin. Ne sisältävät pääosin typpeä, joten niiden aineominaisuuksina voidaan käyttää typen arvoja. Yleisesti ilman inerteille aineille käytetään nimitystä ”raakatyppi” ja merkintää N_{2r} . Taulukosta 5.1. nähdään, että kuivan ilman moolimassa on noin 28,965 g/mol, josta happea on 20,948 vol-% ja raakatyppiä 79,052 vol-%. Raakatyypelle saadaan näin mooliosuus, joka ilman kokonaismäärästä on noin 3,77. (Raiko et al. 2002, s. 35.)

Tunnettaessa polttoaineen kemiallinen koostumus ja sen palamisreaktio voidaan teoreettinen palamisilmantarve sekä syntyvät savukaasut laskea. Teoreettiselle palamisreaktiolle ilmassa voidaan kirjoittaa yleisesti yhtälö (15) yhdisteelle ($CHONS$), joka sisältää hiiltä, vetyä, happea, typpeä ja rikkiä

$$C_u H_v O_w N_x S_y + \left(u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right) (O_2 + 3,77 N_2) \rightarrow u CO_2 + \frac{v}{2} H_2 O + y SO_2 + \left[3,77 \left(u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2} + y \right) + \frac{x}{2} \right] N_2 \quad (15)$$

missä u, v, w, x ja y voivat saada arvoja ≥ 0 . (Raiko et al. 2002, s. 35.)

Teoreettista eli stökiometristä ilmamäärää laskettaessa oletetaan polttoaineen palaminen täydelliseksi. Käytännön sovelluksissa polttoaineen täydellinen palaminen vaatii lähes aina teoreettista ilmamäärää enemmän ilmaa. Poltossa käytettävän todellisen ilmamäärän ja stökiometrisen ilmamäärän suhdetta nimitetään ilmakertoimeksi. Ilmakeroin voidaan laskea yhtälöllä (16)

$$\lambda = \frac{N_i}{N_{i,stoik}} \quad (16)$$

missä λ on ilmakerroin

N_i on poltossa käytettävä ilmamäärä (mol/kg_{pa})

$N_{i,stoik}$ on teoreettiseen eli stökiometriseen palamiseen vaadittava ilmamäärä (mol/kg_{pa}). (Raiko et al. 2002, s. 39; Pitkänen 2013, s.11.)

5.3 Termodynamiikan I pääsääntö

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan voidaan energiataseyhtälö (17) kirjoittaa tarkasteltavalle systeemille seuraavaan muotoon

$$\Delta U = W + Q \quad (17)$$

missä ΔU on systeemin sisäenergian muutos

W on systeemiin tehty työ

Q on systeemiin siirtyvä lämpö. (Raiko et al. 2002, s. 49.)

Ensimmäisen pääsäännön yhtälö (17) voidaan johtaa differentiaalimuotoon, jolloin siirtyvälle lämpömäärälle saadaan yhtälö (18) lausumalla työ tilavuudenmuutostyönä

$$dQ = dU + pdV \quad (18)$$

missä dQ on systeemin lämpömäärän muutos

dU on systeemin sisäenergian muutos

p on systeemin paine

dV on systeemin tilavuuden muutos. (Raiko et al. 2002, s. 49.)

Entalpia määritellään yhtälöllä (19) seuraavasti

$$H = U + pV \quad (19)$$

missä H on entalpia

U on sisäenergia

p on paine

V on tilavuus. (Raiko et al. 2002, s. 49.)

Edellisestä yhtälöstä (19) saadaan entalpian muutokselle yhtälö (20)

$$dH = dU + pdV + Vdp \quad (20)$$

missä dH on entalpian muutos

dU on sisäenergian muutos

p on paine

dp on paineen muutos

V on tilavuus

dV on tilavuuden muutos. (Raiko et al. 2002, s. 49.)

Yhtälöiden (18) ja (20) perusteella saadaan lämpömäärän muutokselle yhtälö (21)

$$dQ = dH - Vdp \quad (21)$$

missä dQ on systeemin lämpömäärän muutos
 dH on systeemin entalpian muutos
 V on systeemin tilavuus
 dp on systeemin paineen muutos.

Leijukattilassa palaminen tapahtuu vakiopaineessa (isobaarisesti), jolloin yhtälössä (21) siirtyvä lämpömäärä on yhtä suuri kuin entalpian muutos. (Raiko et al. 2002, s. 49.)

5.4 Reaktioentalpia

Entalpian määrittäminen tarkasti eri aineille on lähes mahdotonta, mutta sen sijaan entalpian muutosta voidaan tarkastella paineen ja lämpötilan avulla määrittämällä reaktiolle reaktioentalpia. Reaktion aikana alkuaineista syntyville yhdisteille on mahdollista määrittää reaktiossa tapahtuva entalpian muutos eli muodostumisentalpia, kun referenssitilassa ($p = 100 \text{ kPa}$ ja $T = 298,15 \text{ K}$) alkuaineiden muodotumisentalpia on nolla. Aineen entalpialle voidaan kirjoittaa yhtälö (22) lämpötilassa $T \text{ (K)}$ ja referenssipaineessa 100 kPa

$$H_m(T) = \Delta H_f + H_{mt}(T) \quad (22)$$

missä H_m on aineen entalpia lämpötilassa $T \text{ (kJ/mol)}$
 ΔH_f on aineen muodostumisentalpia (kJ/mol)
 H_{mt} on tuntuva eli taulukkoentalpia (kJ/mol).

Muodostumisentalpiat yleisille aineille ja taulukkoentalpiat yleisille kaasuille on taulukoitu liitteissä 3 ja 4 (Raiko et al. 2002, ss. 694 – 701).

Reaktioentalpia saadaan laskettua yhtälön (22) avulla, kun kunkin reaktiotuotteen muodostumisentalpia kerrotaan komponentin stökiometrisellä kertoimella ja vähennetään näistä reaktion lähtöaineiden vastaavat muodostumisentalpioiden ja stökiometristen kertoimien tulojen summa. Yhtälössä (23) on esitetty yleiselle reaktiolle reaktioentalpian lauseke

$$aA + bB \rightarrow cC + dD$$

$$\Delta H_r = c\Delta H_{f,C} + d\Delta H_{f,D} - (a\Delta H_{f,A} + b\Delta H_{f,B}) \quad (23)$$

missä ΔH_r on reaktioentalpia (kJ/mol)
 ΔH_f on aineen muodostumisentalpia (kJ/mol).
 (Raiko et al. 2002, ss. 50 - 51.)

5.4.1 Lämpöarvo

Polttoaineille voidaan edellä esitetyllä tavalla laskea stökiometrisen palamisreaktion reaktioentalpia eli lämpöarvo. Kaasumaisten ja nestemäisten aineiden lämpöarvo voidaan määrittää helposti sen komponenttien palamisreaktioiden reaktioentalpioiden avul-

la, mutta kiinteille polttoaineille tarkka lämpöarvo voidaan määrittää ainoastaan mitaamalla kalorimetripommissa. Tyypillisesti kiinteät polttoaineet sisältävät happea, joka voi muodostaa erityyppisiä yhdisteitä polttoaineen palavien komponenttien kanssa, josta syystä lämpöarvon määrittäminen alkuainekoostumuksen perusteella on vaikeaa. Eri polttoaineille on taulukoitu kokemuseräisiä lämpöarvoja liitteessä 1, mutta ne voivat poiketa huomattavasti mitatuista arvoista. Aiemmin kappaleessa 4.3 esitettiin kaavat polttoaineen lämpöarvon laskemiseksi. (Raiko et al. 2002, s. 52.)

5.5 Taulukkoentalpia

Kappaleessa 5.3 johdetuista kaavoista voitiin päätellä, että palamisen tapahtuessa vaikeapaineessa on entalpiian muutos yhtä suuri kuin systeemistä siirtyvä lämpömäärä. Näin voidaan kirjoittaa taulukkoentalpian ja polttoaineenlämpöarvon perusteella kuvan 5.1. mukaiselle systeemille energiatase-yhtälö (24) stationääritilassa

$$\dot{m}_{pa} Q_{net,ar} + \dot{m}_{pi} h_t(T_{pi}) = \dot{m}_{sk} h_t(T_{sk}) + \phi_{jä} + \phi_{häv} \quad (24)$$

missä \dot{m}_{pa} on polttoaineen massavirta (kg/s)

$Q_{net,ar}$ on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

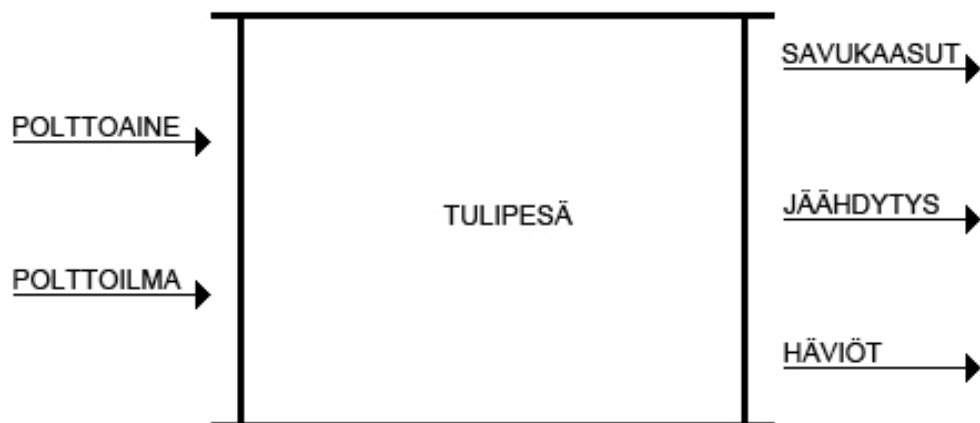
\dot{m}_{pi} on polttoilman massavirta (kg/s)

h_t on taulukkoentalpia (MJ/kg)

\dot{m}_{sk} on savukaasun massavirta (kg/s)

$\phi_{jä}$ on jäähdytyksessä siirtyvä lämpövirta (MW)

$\phi_{häv}$ on tulipesän säteily- ja johtumishäviöt (MW). (Raiko et al. 2002, s. 52.)



Kuva 5.1. Jäähdytetyn tulipesän energiatase (Raiko et al. 2002, s. 53).

Entalpian muutos voidaan lausua myös likimäärin aineen ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan tulon avulla yhtälöllä (25)

$$h_{t,i}(T_i) \approx c_{p,i}(T_i - T_{ref}) \quad (25)$$

missä $h_{t,i}$ on aineen i entalpian muutos

$c_{p,i}$ on aineen i ominaislämpökapasiteetti keskimääräisessä lämpötilassa (kJ/kgK)

T_i on aineen i lämpötila taserajalla (K)

T_{ref} on referenssilämpötila (K). (Raiko et al. 2002, s. 54.)

Kappaleessa 5.2 johdettiin polttoilmassa olevan kuivan ilman ja ilman sisältämän vesihöyryn seos, jonka mukaan savukaasua voidaan käsitellä yli-ilman ja stökiometrisen savukaasun seoksena. Savukaasut jäähdytetään tulipesässä lämmönsiirtimessä vakiopaineessa, jolloin voidaan siirtyvälle lämpöteholle kuvan 5.2. mukaisesti kirjoittaa yhtälö (26)

$$\phi_{jää} \approx \dot{m}_{sk} c_{p,sk} (T_1 - T_2) \quad (26)$$

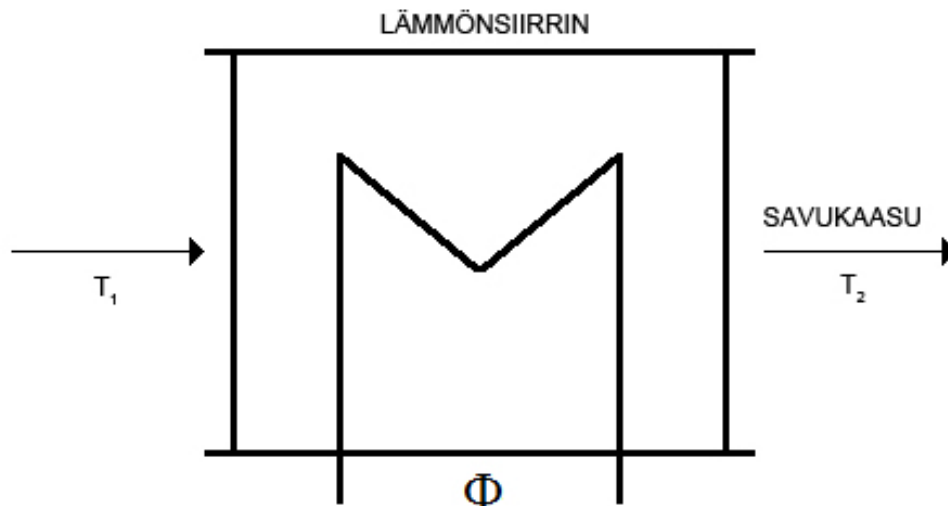
missä $\phi_{jää}$ on jäähtymyksessä siirtyvä lämpövirta (MW)

\dot{m}_{sk} on savukaasun massavirta (kg/s)

$c_{p,sk}$ on savukaasun ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

T_1 on lämpötila ennen lämmönsiirrintä (K)

T_2 on lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen (K). (Raiko et al. 2002, s. 54.)



Kuva 5.2. Savukaasun jäähtyminen lämmönsiirtimessä (Raiko et al. 2002, s. 54).

Savukaasut sisältävät useita kaasuja, joiden osuudet tulee selvittää todellisen lämpökapasiteetin laskemiseksi. Savukaasun lämpökapasiteetti voidaan laskea sen komponenttien massaosuuksien ja lämpökapasiteettien avulla yhtälön (27) mukaisesti

$$c_{p,sk} = \sum_i x_i c_{p,i} \quad (27)$$

missä $c_{p,sk}$ on savukaasun ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

x_i on komponentin i massaosuus

$c_{p,i}$ on komponentin i ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK). (Raiko et al. 2002, s. 54.)

Savukaasujen ja ilman komponenttien muodostamalle kaasulle voidaan laskea ominaislämpökapasiteetti käyttämällä yhtälön (28) mukaista polynomisovitetta

$$c_{p,i} = R \sum_{k=1}^{12} C_k T_R^{k-6} \quad (28)$$

missä R on komponentin i kaasuvakio (kJ/kgK)

C_k on soviteen kerroin komponentille i

T_R on dimensioton lämpötila. (Raiko et al. 2002, s. 704.)

Yhtälössä (28) esitetyille kaasuvakiolle R ja soviteelle C_k on esitetty taulokkoarvot liitteissä 5 ja 6. Sovitteita voidaan käyttää lämpötilan ollessa $200 \text{ [K]} \leq T \leq 2500 \text{ [K]}$. Dimensiottomalle lämpötilalle T_R on esitetty yhtälössä (29) laskentakaava

$$T_R = \frac{T}{1000 \text{ [K]}} \quad (29)$$

missä T on lämpötila (K). (Raiko et al. 2002, s. 704.)

6 LEIJUKATTILA

6.1 Leijupoltto

Leijupoltto on kehittynyt kaupalliseksi sovellukseksi ympäristöystävällisenä tapana polttaa kiinteitä polttoaineita 1970-luvulta lähtien ja sen käyttö polttoteknisenä sovelluksena on kehittynyt merkittävästi viime vuosikymmenien aikana. Suomi on yksi maailman johtavista maista leijukattilatekniikan polttosovellusten kehittämisessä. Leijupoltton etuihin kuuluu sen soveltuvuus huonolaatuisille polttoaineille, joiden poltto ei onnistuisi muilla polttotavoilla ilman erityisjärjestelyitä. Lisäksi leijupoltossa etuna ovat helposti toteutettavissa oleva rikinpoistojärjestelmä sekä vähäiset NO_x ja palamattomien partikkeleiden päästöt. Leijupoltton avulla on mahdollista polttaa eri polttoainelajeja, joiden laadun vaihtelu on suurta, hyvällä hyötysuhteella. Leijupoltossa voidaan saavuttaa jopa yli 99 % palamishyötysuhde. (Raiko et al. 2002, s. 490; Pitkänen 2013, s. 13; Raiko & Saarenpää 2009, s. 94.)

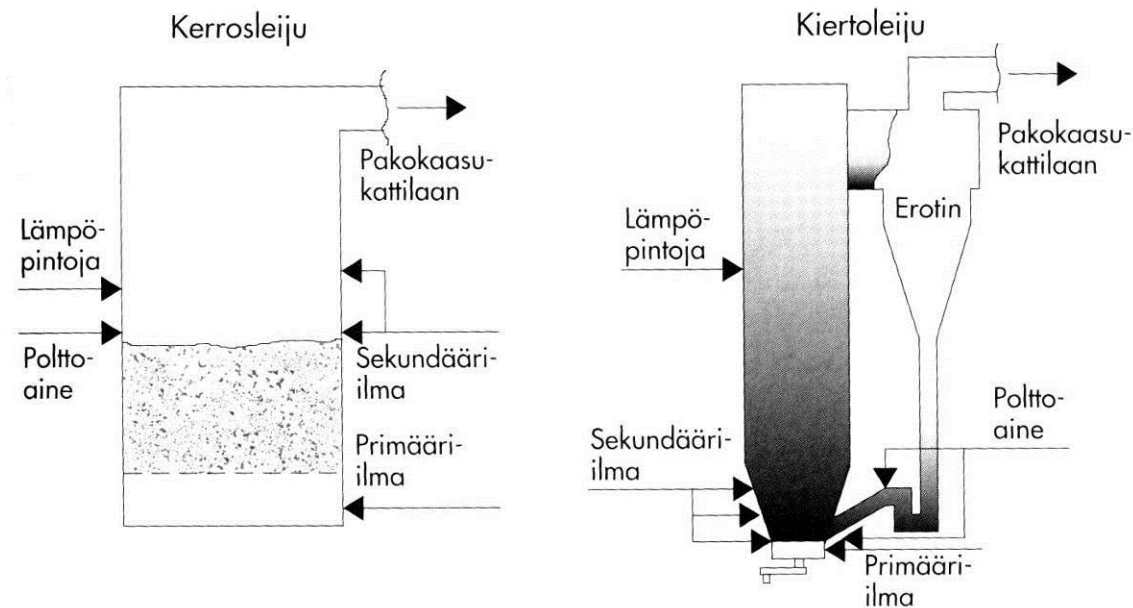
Teollisuuden voimalaitoksissa tuotetaan pääosin prosessihöyryä, joka käytetään esimerkiksi paperitehtaalla paperin kuivaukseen sekä erilaisiin lämmitystarpeisiin. Teollisuuden voimalaitoksissa rakennusaste jää helposti alhaisemmaksi kuin kaukolämpöä tuottavissa laitoksissa, johtuen voimalaitoksen erilaisesta käytöstä. Tehtailla käyttökohteisiin vaaditaan usein korkeampia painetasoja sekä höyrykattilat ovat suunniteltu kaukolämpölaitoksia alhaisemmille paine- ja lämpötilatasoille. Nykyisin teollisuudessa käytetäänkin tästä syystä pääosin leijukerros polttoa hyödyntäviä leijukattiloita, joissa tehtaan sisältä sivutuotteina syntyvät poltettavat jätteet voidaan hävittää. Tämä vaatii myös erityisjärjestelyitä polttoaineen käsittely- ja vastaanottojärjestelmiltä, joissa usein ostettavat polttoaineet, ja tehtaan sivutuotteet käsitellään omalla linjalla, joista muodostetaan kattilalle sopiva sekoitus polttoa varten. (Halonen et al. 2003, s. 11.)

6.1.1 Tekniikat

Leijupoltton sovelluksia ovat kupliva leijukerros (kerrosleiju) tai kiertoleijukerros (kiertoleiju), joiden periaatteet on esitetty kuvassa 6.1. Kerrosleijukattilassa leijukerroksen hiukkaset pysyvät leijukerroksessa, kun taas kiertoleijukattilassa kiintoainehiukkaset lähtevät leijutuskaasun mukana pois leijutustilasta ja palautuvat takaisin petiin savukaasujen erottimen kautta jatkuvuustilan aikaansaamiseksi. Leijukerroksen lämpötila vaihtelee leijupoltossa tyypillisesti 750 ja 950 °C:een välillä. Lämpötilan ylärajan tulee olla alle polttoaineen tuhkan pehmenemislämpötilan. (Raiko et al. 2002, s. 490; Pitkänen 2013, s. 13.)

Kuplivassa leijupoltossa polttoaineen palaminen tapahtuu jauhemaisen, leijuva materiaalin sisällä, jota leijutetaan palamiseen tarvittavalla ilmalla, johtamalla se sopivalla nopeudella kattilan pohjalta arinan läpi. Tyypillisesti leijutusmateriaalin halkaisijan keskikoko on luokkaa 1 mm, joka mahdollistaa enintään 1 – 3 m/s suuruisen leijutusnopeuden käytön, jotta leijutusmateriaali pysyy palotilassa. Normaalipaineisessa kuplivassa leijupoltossa voidaan saavuttaa enintään noin 3 MW/m^2 polttoaineteho reaktorin poikkipinta-alaa kohden. Polttoilmasta noin puolet tuodaan leijutusarinan kautta ja lopuosa ilmasta johdetaan leijukerroksen yläpuoliseen palotilaan. Sopivalla ilman jaolla voidaan vähentää merkittävästi poltossa syntyviä NO_x -päästöjä. Kuvassa 6.1. on esitetty kerrosleijun ilmanjaon ja polttoaineen syötön periaate. Kuplivan leijukerroksen etuna voidaan pitää sen soveltuvuutta hyvin märille polttoaineille sekä sen halpaa hintaa, johtuen sen yksinkertaisesta rakenteesta. (Raiko et al. 2002, ss. 490 - 491; Pitkänen 2013, s. 14; Raiko & Saarenpää 2009, s. 92.)

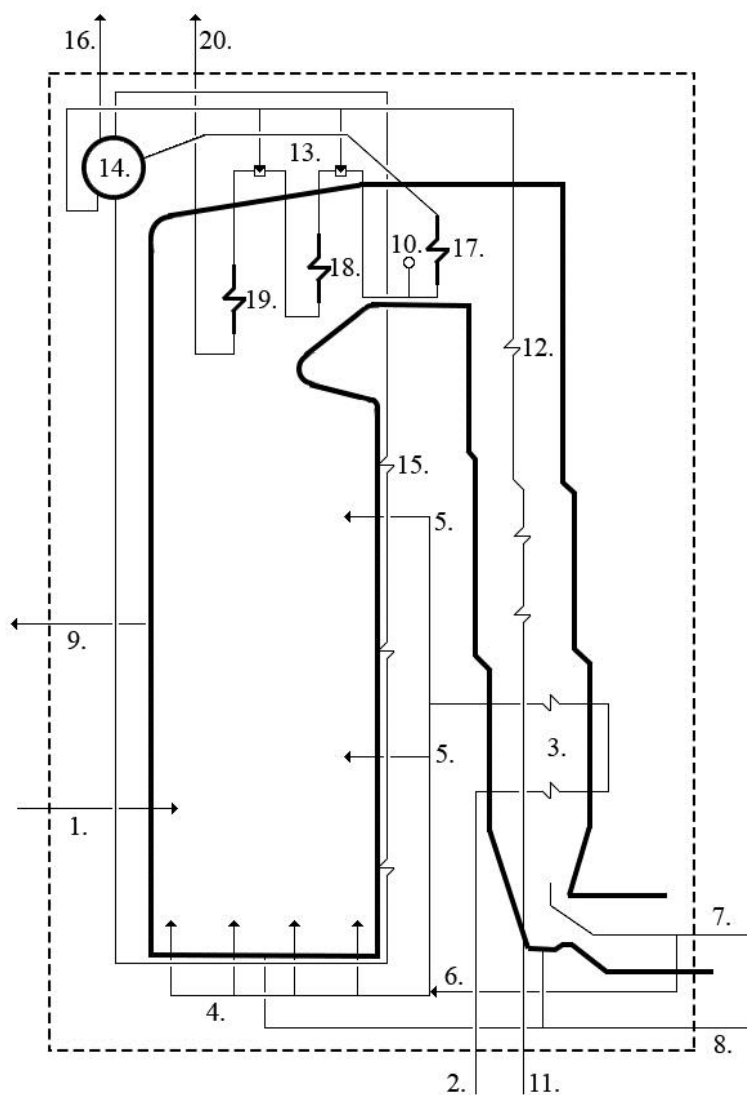
Kiertoleijupoltossa leijutusmateriaalina käytetään yleensä alle 0,5 mm halkaisijan hiukkasia, jolloin tyypillisesti suurimmat käytetyt leijutusnopeudet ovat 8 - 10 m/s. Tästä syystä polttoaineteho reaktorin pinta-alaa kohden on hiiltä poltettaessa normaalipaineisessa kattilassa enintään noin 6 MW/m^2 eli noin puolet suurempi kuplivaan leijukerrokseen verrattuna. Kiertoleijukattilan etuna kuplivaan leijukattilaan verrattuna on myös sen parempi palamishyötysuhde hiiltä poltettaessa, matalammat typpi- ja rikkipäästöt sekä laajempi polttoainevalikoima. (Raiko et al. 2002, ss. 490 - 491; Pitkänen 2013, s. 14)



Kuva 6.1. Kerrosleiju- ja kiertoleijukattilan toimintaperiaatteet. (Raiko et al. 2002, s. 491).

6.1.2 Kattilan lämmönsiirto

Leijukattilaa voidaan pitää yleisesti höyrykattilan tavoin lämmönsiirtimenä. Leijukattilassa polttoaineen palaessa syntyvät kuumat savukaasuvirrat luovuttavat lämpöä kattilan lämpöpintojen kautta kattilassa höyrystettävään veteen. Kattilan lämpöpinnat voidaan jakaa neljään osaan: ilman esilämmittimeen eli luvoon, syöttöveden esilämmittimeen eli ekonomaiseriin, höyrystimeen ja tulistimeen. Näiden lisäksi kattilassa voi olla lämmön talteenottimia, kuten kiertoaasupuhallin, joka puhaltaa osan kylmistä savukaasuista takaisin leijukerrokseen pedin jäähtymistä varten petilämmön noustessa liian korkeaksi sekä erilaisia syöttöveden esilämmittimiä ennen syöttövesisäiliötä, jotka keräävät kattilan hukkaenergiaa talteen mm. ulospuhalluksesta ja savukaasuista. Suurin osa kattilan painehäviöistä tapahtuu tulistimissa. Kuvassa 6.2. ja taulukossa 6.1. on esitetty yleisesti leijukattilan lämmönsiirtoon liittyviä energiavirtoja sekä kattilan eri komponentteja. (Raiko & Saarenpää 2009, ss. 86-87; Raiko & Kirvelä 2008, s. 86.)



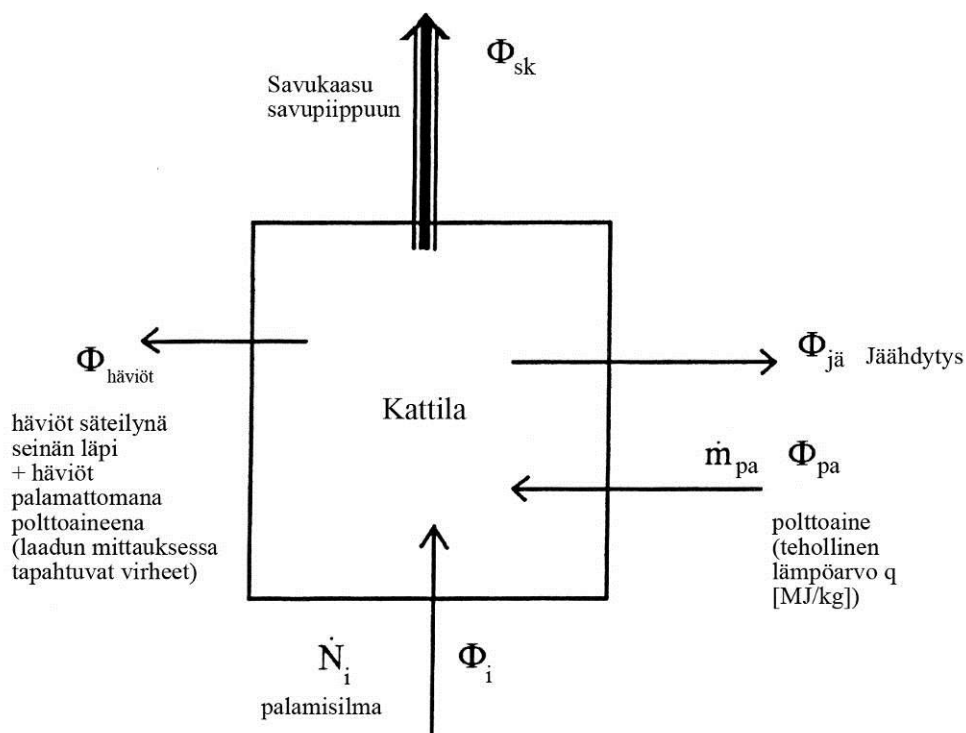
Kuva 6.2. Leijukattilan energiavirrat, lämpöpinnat ja komponentit.

Taulukko 6.1. Leijukattilan energiavirrat, lämpöpinnat ja komponentit savukaasupuolella ja vesihöyrypiirissä.

| Savukaasupuoli | | Vesihöyrypiiri | |
|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| 1. | Polttoaine | 11. | Syöttövesi |
| 2. | Palamisilma | 12. | Syöttöveden esilämmitin (ekonomaiser) |
| 3. | Palamisilman esilämmitin (luvo) | 13. | Ruiskutusvesi |
| 4. | Primääri-ilma | 14. | Höyrylieriö |
| 5. | Sekundääri- ja tertiääri-ilma | 15. | Höyrystin |
| 6. | Kiertokaasu | 16. | Ulospuhallus |
| 7. | Savukaasu | 17. | Primääritulistin |
| 8. | Tuhka | 18. | Tertiääritulistin |
| 9. | Säteily- ja johtumishäviöt | 19. | Sekundääritulistin |
| 10. | Nuohoushöyry | 20. | Tulistettuhöyry |

6.2 Energiatase

Leijukattilalle voidaan muodostaa energiataase tarkastelemalla energiavirtoja taserajalla kappaleessa 5.5 esitetyn kuvan 5.1. mukaisesti. Yksinkertaistetaan laskentaa tarkastelemalla ainoastaan taserajan yli meneviä energiavirtoja, jolloin saadaan muodostettua energiataase kattilalle. Kuvassa 6.3. on esitetty yksinkertaistettu kuva leijukattilan sisään ja ulos menevistä energiavirroista.



Kuva 6.3. Kattilan energiataase (Raiko & Kirvelä 2008, s. 92).

Kuvan 6.3. mukaan voidaan muodostaa energiataseelle yhtälö (30) kappaleessa 5.5 esitetyn yhtälön (24) mukaisesti sijoittamalla yhtälön vasemmalle puolelle kattilan sisään menevät energiavirrat ja oikealle puolelle kattilasta poistuvat energiavirrat.

$$\Phi_{pa} + \Phi_i = \Phi_{jä} + \Phi_{sk} + \sum \Phi_{häv} \quad (30)$$

missä Φ_{pa} on polttoaineen lämpöteho
 Φ_i on polttoilman lämpöteho
 $\Phi_{jä}$ on veden höyrystämiseen kulutettu lämpöteho
 Φ_{sk} on savukaasun mukana poistuva lämpöteho
 $\Phi_{häv}$ on säteily- ja johtumishäviöt, ulospuhallushäviöt, tuhkan mukana poistuva lämpöteho sekä polttoaineen laadunmittausvirheet. (Raiko & Kirvelä 2008, s. 92.)

6.2.1 Savukaasupuoli

Leijukattilan savukaasupuolen energiavirtoihin voidaan yhtälön (30) mukaan laskea polttoaineen lämpöteho, polttoilman lämpöteho, savukaasun mukana poistuva lämpöteho, säteily- ja johtumishäviöt, tuhkan mukana poistuva lämpöteho sekä polttoaineiden laadunmittausvirheet, jotka voidaan tässä tapauksessa määritellä häviöinä.

Polttoaineen lämpöteho voidaan laskea polttoaineen massavirran ja kostean polttoaineen tehollisen lämpöarvon tulona yhtälöllä (31) yhtälön (24) mukaisesti

$$\Phi_{pa} = \eta \dot{m}_{pa} Q_{net,ar} \quad (31)$$

missä η on palamishyötysuhde (leijukattilalla voidaan olettaa arvoksi 1)
 \dot{m}_{pa} on polttoaineen massavirta (kg/s)
 $Q_{net,ar}$ on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg). (Pitkänen 2013, s. 15.)

Kosteanpolttoaineen tehollinen lämpöarvo saadaan laskettua aiemmin esitetyllä yhtälöllä (6), kun tunnetaan polttoaineen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa sekä saapumiskosteus.

Kattilaan syötettävän polttoilman mukana tuleva lämpöteho voidaan laskea ilman moolivirran ja kostean ilman tuntuvan entalpian tulona yhtälöllä (32)

$$\Phi_i = \dot{N}_i H_{mt,i}(T_i) \quad (32)$$

missä \dot{N}_i on kostean ilman moolivirta (kmol/s)
 $H_{mt,i}$ on kostean ilman tuntuva entalpia lämpötilassa T_i (MJ/kmol). (Pitkänen 2013, s. 15.)

Palamisilman tuntuvat entalpiat ovat esitettynä liitteessä 7 (Raiko 2013). Kostean ilman moolivirta voidaan hakea kattilajärjestelmästä.

Savukaasun mukana poistuva lämpöteho saadaan laskettua savukaasun moolivirran ja tuntuvan entalpian tulona yhtälöllä (33)

$$\Phi_{sk} = \dot{N}_{sk} H_{mt,sk}(T_{sk}) \quad (33)$$

missä \dot{N}_{sk} on savukaasun moolivirta (kmol/s)

$H_{mt,sk}$ on savukaasun tuntuva entalpia lämpötilassa T_{sk} (MJ/kmol). (Pitkänen 2013, s. 16.)

Savukaasun tunnut entalpiat ovat esitettynä liitteessä 7 (Raiko 2013). Savukaasun moolivirta voidaan hakea kattilajärjestelmästä.

Leijukattilassa tapahtuvat säteily- ja johtumishäviöt voidaan laskea polttoainetehosta. Niiden tarkka laskeminen on erittäin vaikeaa, johtuen kattilan monimutkaisesta rakenteesta. Kirjallisuudessa on kuitenkin esitetty häviöiden olevan noin 1-2 % polttoainetehosta. Tämän perusteella voidaan kirjoittaa yhtälö (34)

$$\Phi_{sät} = a\Phi_{pa} \quad (34)$$

missä a on säteily- ja johtumishäviöistä syntyvä häviökerroin (0,01-0,02)

Φ_{pa} on polttoaineen lämpöteho. (Pitkänen 2013, s. 16.)

Tuhkan mukana poistuva lämpöteho voidaan laskea kattilasta poistettavan tuhkan määrän ja sen tuntuvan entalpian tulona. Tuntuva entalpia voidaan laskea myös ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan tulona. Alla on esitetty tuhkan lämpötehon laskemiseen käytettävä yhtälö (35)

$$\Phi_{tu} = \dot{m}_{tu} H_{mt,tu}(T_{tu}) = \dot{m}_{tu} c_{p,tu} (T_{tu} - T_{ref}) \quad (35)$$

missä \dot{m}_{tu} on tuhkan massavirta (kg/s)

$H_{mt,tu}$ on tuhkan tuntuva entalpia lämpötilassa T_{tu} (kJ/kg)

$c_{p,tu}$ on tuhkan ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

T_{tu} on leijukerroksesta poistettavan tuhkan lämpötila (°C)

T_{ref} on referenssilämpötila (25 °C). (Pitkänen 2013, s. 16.)

Leijukattilasta poistettavan tuhkan keskimääräiseksi ominaislämpökapasiteetiksi on määritetty kirjallisuudessa 1,00 kJ/kgK (Huhtinen et. al 1997).

Polttoaineen mittauksessa tapahtuvat mittavirheet liittyvät polttoaineen kosteuden määrittämiseen sekä polttoaineen mukana tulevaan inertinaineen määrään. Tämän hetkellä menetelmillä kiinteiden polttoaineiden tarkka laadunmääritys on lähes mahdotonta. Tässä työssä esiteltävällä röntgenillä on kuitenkin mahdollista mitata koko polttoainekuorman sisältävä kosteus sekä inertinaineksen määrä. Polttoaineiden mittauksissa syntyvät häviöt voidaan laskea kattilan energiataseesta, kun sisään menevät ja ulostulevat energiavirrat merkataan samansuuruisiksi yhtälön (30) mukaisesti, jolloin saadaan polttoaineiden häviöiden laskemiseen käytettävä yhtälö (36)

$$\Phi_{häv,pa} = \Phi_{sis} - \Phi_{ulos} \quad (36)$$

missä Φ_{sis} on energiavirrat kattilan sisään (MW)

Φ_{ulos} on energiavirrat ulos kattilasta (MW).

6.2.2 Vesi-höyrypiiri

Leijukattilan vesi-höyrypiirin energiavirtoihin kuuluu yhtälön (30) mukaisesti kattilan jäähdytykseen kulutettu energia eli se energiamäärä, joka luovutetaan veden höyrystämiseen sekä kattilaveden puhdistukseen vaadittava ulospuhallushäviö.

Kattilassa veden höyrystämiseen kulutettu energia eli energia joka siirtyy lämpönä veteen, voidaan laskea yhtälöllä (37) johtamalla se kattilan jäähdytyksen yhtälöstä (26)

$$\Phi_{lh} = \dot{m}_{th}(h_{th}(T_{th}) - h_{sv}(T_{sv})) \quad (37)$$

missä Φ_{lh} on höyryyn siirtyvä lämpöteho (MW)

\dot{m}_{th} on tuorehöyryn massavirta (kg/s)

h_{th} on tuorehöyryn entalpia lämpötilassa T_{th} ja paineessa p_{th} (kJ/kg)

T_{th} on tuorehöyryn lämpötila (°C)

h_{sv} on syöttöveden entalpia lämpötilassa T_{sv} ja paineessa p_{sv} (kJ/kg)

T_{sv} on syöttöveden lämpötila (°C).

Tuorehöyryn ja syöttöveden entalpia voidaan lukea liitteessä 8 esitetystä veden entalpia-entropia diagrammista. (Raiko & Saarenpää 2009.)

6.2.3 Hyötysuhde

Leijukattilalle voidaan määrittää hyötysuhde yleisen lämpövoimakoneen tavoin tarkastelemalla sen tehokkuutta. Leijukattilan energiataseessa saatujen energiavirtojen avulla voidaan kirjoittaa lämpöhyötysuhteen laskemiseksi yhtälö (38)

$$\eta = \frac{\text{saatu lämpö}}{\text{tuotu lämpö}} = \frac{\Phi_{lh}}{\Phi_{sis}} \quad (38)$$

missä Φ_{lh} on höyryyn siirtyvä lämpöteho (MW)

Φ_{sis} on kattilaan tuota lämpöteho (MW). (Raiko & Kirvelä 2008, s. 55.)

7 CASE KAIPOLA

7.1 Tehtaan kuvaus

Kaipolan paperitehdas kuuluu UPM Jokilaakson tehtaiden integraatioon. Kaipolan paperitehdas sijaitsee Jämsässä Päijänteen rannalla ja siellä on tuotettu paperi jo vuodesta 1952 lähtien. Kuvassa 7.1. on esitetty Kaipolan paperitehtaan eri yksiköt. Tehdas käyttää pääraaka-aineina sahahaketta, keräyspaperia sekä lisäksi kuusikuitupuuta.

Kaipolan paperitehtaalla valmistetaan aikakauslehti-, sanomalehti- ja luettelolehtipaperia kolmella paperikoneella, joiden yhteinen tuotantokapasiteetti on 710000 tonnia vuodessa. Paperikoneiden lisäksi tehtaalla toimii Suomen suurin siistaamo, hiertämö sekä voimalaitos. Siistaamo käyttää 2/3 kotimaan talteen otetusta kotikeräyspaperista, josta tuotetaan ns. siistattua massaa. Siistaamon tuotantokapasiteetti on noin 540 tonnia siistausmassaa vuorokaudessa. Hiertämöllä tuotetaan kuumahierrettä kuusikuidusta sekä höyryä paperikoneiden käyttöön kahdella lämmön talteenotolla yhteensä 76 MW teholla. (UPM intranet 2014.)

Voimalaitoksella tuotetaan kolmella kattilalla, yhdellä pääkattilalla ja kahdella varaja huippukuormakattilalla höyryä paperikoneiden käyttöön. Pääkattila tuottaa 117 MW teholla höyryä käyttäen polttoaineenaan kuori- ja kuitulietettä, metsähaketta, sahojen sivutuotteita ja muita biopolttoaineita sekä turvetta ja öljyä. (UPM intranet 2014.)



Kuva 7.1. Kaipolan paperitehdas (UPM intranet 2014).

7.2 Mittausten toteutus

Mittaukset toteutettiin Kaipolan paperitehtaalla 10.3.2014 kello 6:00 ja 13.3.2014 kello 23:00 välisenä aikana. Mittauksia varten tehtaan energiapuun toimitukset keskitettiin yhdelle toimittajalle mahdollisten punnitusvirheiden poistamiseksi. Voimalaitokselle saapuneet kuormat punnittiin kuorma-autovaa’alla ja jokaisesta kuormasta mitattiin kosteus erityisjärjestelyin neljällä eri sovelluksella. Tarkkojen tulosten saamiseksi pyrittiin kaikki kattilaan syötettävä polttoaine mittaamaan normaalitilannetta tarkemmin sekä optimoimaan kattilaan syötettävät polttoaineet ainoastaan työssä mitattuihin polttoaineisiin.

7.2.1 Mittausjärjestelyt

Mittauksia varten puunhuoltologiikka järjestettiin uudelleen mahdollisten punnitusvirheiden pois sulkemiseksi. Metsäenergiatoimitukset keskitettiin yhden toimittajan varaan siten, että autokuljettajat ohjeistettiin erikseen mittauksia varten. Mittausten aikana kaikki metsäenergiakuormat purettiin murskan kautta, josta myös näytteet otettiin.

Tämän lisäksi turpeen toimitukset optimoitiin siten, että joka päivä toimitettiin 4 kuormaa. Kaikista turve kuormista otettiin useampia käsinäytteitä laadun varmistamiseksi, sillä purku tapahtui eri linjalle kuin metsäpolttoaineiden purku.

Voimalaitoksella polttoaineen syöttö kattilaan tehtiin myös erityisjärjestelyin. Polttoaineiden syöttö kattilaan tapahtui polttoainevarastosta, joka pyrittiin tyhjentämään mahdollisimman alas ennen kuin työssä mitattuja polttoaineita syötettiin. Varaston tyhjentäminen päätettiin 10.3.2014 kello 13:00, jolloin varaston pinta oli noin metrin lattiasta, jonka jälkeen siilo täytettiin uudelleen työssä mitatuilla polttoaineilla. Tänä aikana toimitetut kuormat varastoitiin erilliseen kasaan polttoainekentälle, josta ne syötettiin myöhemmin varastoon. Kattiladatan alkukeräyspisteeksi valittiin 10.3.2014 kello 14:00, jolloin mitattuja metsäpolttoaineita alkoi virrata polttoainesiiloon. Viimeiset työssä mitatut polttoaineet saatiin poltettua kattilassa 13.3.2014 kello 23:00, jolloin siirryttiin normaaliin kattilan ajoon ja polttoaineen syöttöön.

7.3 Polttoaineiden laadunmittausmenetelmät

Työssä polttoaineiden laatu pyrittiin todentamaan niin portilla hinnoittelua varten kuin voimalaitoksen kattilassa, tutkien polttoaineen todellista energiasisältöä. Polttoaineiden laadunmittaus suoritettiin neljällä eri sovelluksella metsäpolttoainekuormien osalta. Turvekuormat mitattiin kolmella eri sovelluksella. Metsäpolttoaineiden kuormista mitattiin laatu Senfit:n BMA (Biomass Moisture Analyzer) pikakosteusmittarilla, uuninäytteellä, kuskien kokoomanäytteellä sekä työtä varten asennetulla röntgenmittalaitteella. Näiden lisäksi polttoaineiden laatu pyrittiin varmistamaan kattilan taselaskennan keinoin, jonka teoriaa esiteltiin aiemmin kappaleessa 6.

7.3.1 Ämpäriotanta

Ämpäriotannalla tarkoitetaan polttoainekuormasta otettavaa näytettä laadunmäärittämistä varten, joko manuaalisesti tai koneellisesti. Ämpäriotannassa voimalaitoksen murskaimelta otettiin näyte, joka voitiin ottaa missä vaiheessa tahansa kuorman purkua. Työn aikana sovellettiin kappaleessa 3 esiteltyä näytteenottostandardin mukaista näytteenottoa.

Metsäpolttoainekuormista otettiin murskalta koneellisella näytteenottomella taulukon 3.1. mukaisesti näytteet, 2 näytettä nupista ja 4 näytettä perävaunusta. Ennen näytteen kosteusanalyysiä näytteet murskattiin pienemmäksi jakeeksi hienomurskaimella. Jokaisesta yksittäisnäytteestä analysoitiin kosteus erikseen Senfit BMA pikakosteusmittarilla 300 grammasta näytettä.

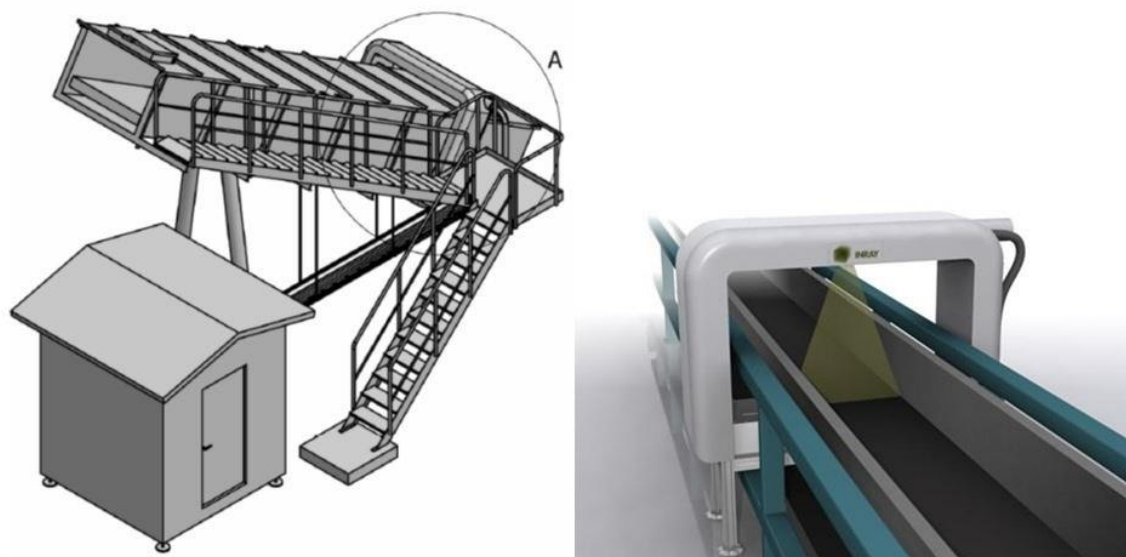
Kuorman yksittäisnäytteistä muodostettiin kokoomanäyte uuninäytettä varten, joista määritettiin myös kosteus. Yksittäisnäytteet yhdistettiin saavissa kokoomanäytteeksi ja sekoitettiin huolellisesti ennen näytteen muodostamista soveltaen luvussa 3.4 esiteltyä standardin mukaista näytteen käsittelyä.

Kuljettajat ottivat vertailunäytteet normaalitilanteen mukaisesti, 1 näyte kuormasta päivän kokoomanäytteeseen. Kuskien ottamista näytteistä muodostettiin kokoomanäyte voimalaitoksen omaa normaalitilanteen mukaista näytteenottoa varten, josta analysoitiin päiväkohtainen kosteus toimittaja- ja lajikohtaisesti.

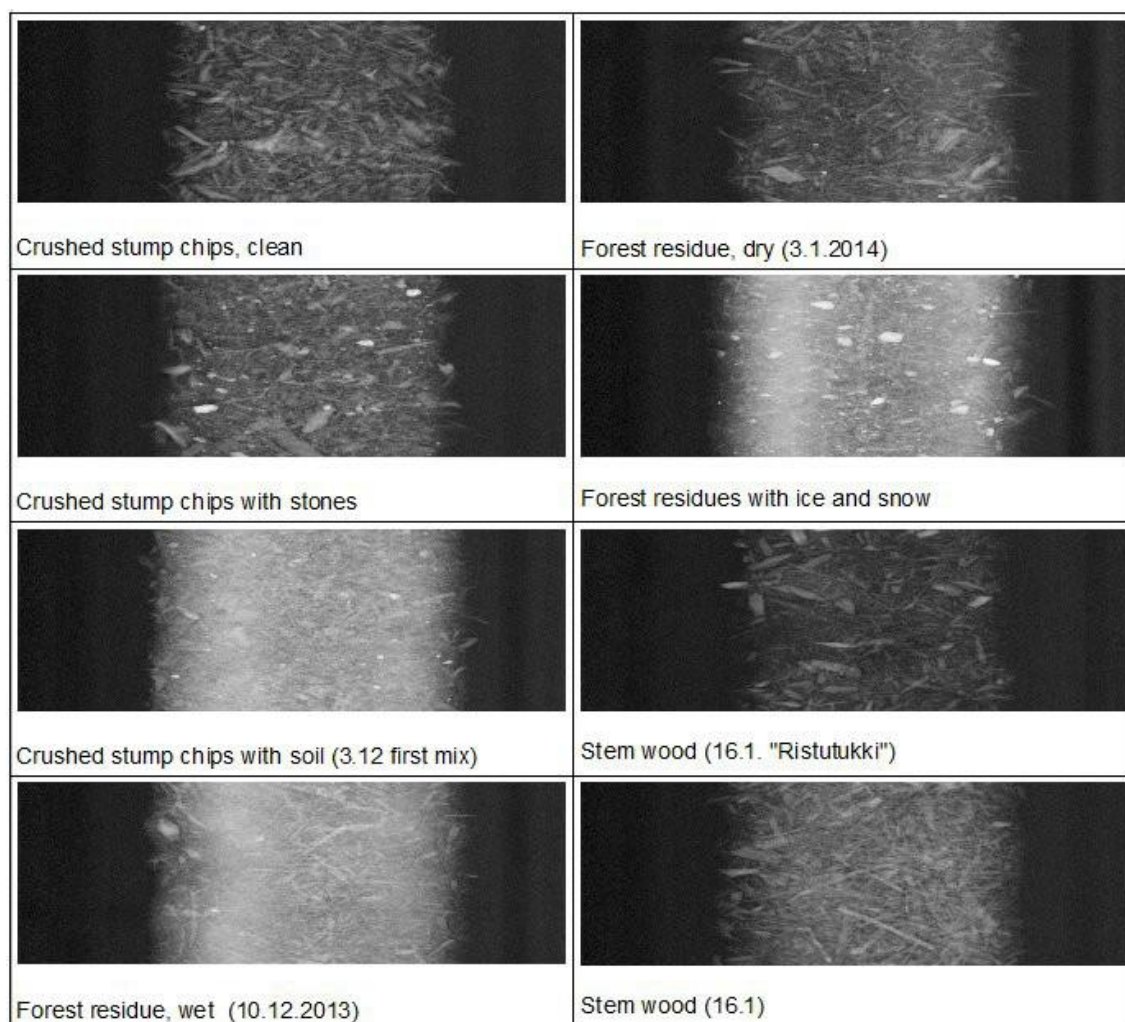
7.3.2 Röntgenmittalaitteisto

Polttoaineiden epäpuhtaudet sekä suuret kosteusvaihtelut kuorman sisäisesti pystytään selvittämään röntgenmittalaitteiston skannaamalla koko kuorma polttoainekuljettimella (Inray Oy 2013). Suurimmat laatuongelmat biopolttoaineita polttavissa voimalaitoksissa liittyvätkin tällä hetkellä kuorman sisällön selvittämiseen. Epäpuhtauksia esiintyy erityisesti kannon sekä kantomurskeen mukana, jotka vaikuttavat niin polttoaineen hintaan kuin voimalaitoksen toimintaa (Halonen 2013). Voimalaitoksen kannalta epäpuhtaudet, kuten hiekka, multa, kivet sekä muut palamattomat ainekset tuottavat ongelmia niin hinnan määrittämiseen kuin myös polttoaineiden syöttöön. Erityisesti kivien sekä hiekan kuluttava vaikutus liinoin, ruuveihin sekä kolakuljettimiin voimalaitoksessa on huomattava kulutekijä porttihinnan lisäksi.

Työssä tutkittiin Kaipolan voimalaitoksessa käytettävän röntgenmittalaitteiston toimintaa ja pyrittiin hyödyntämään sitä polttoaineen laadunseurannassa. Röntgenmittalaitteisto oli työn mittausten ajan asennettuna voimalaitoksen purkupaikalle murskaimen jälkeiselle polttoainekuljettimelle. Kuljettimella kulkevasta polttoainevirrasta määritettiin jatkuvatoimisesti polttoaineen kosteus, polttoainetyyppi sekä vierasesineet. Röntgenmittalaitteisto mahdollisti kuormakohtaisen polttoaineen kosteus- ja laatutiedon tarkastelun jatkuvatoimisesti. Kuvassa 7.2. on esitettyä röntgenmittalaitteisto asennettuna polttoainekuljettimelle ja kuvassa 7.3. on esitettyä röntgenin kuvaama polttoainepatja. (Inray Oy 2013.)



Kuva 7.2. Röntgenmittalaitteisto asennettuna polttoainekuljettimelle (Inray Oy 2013).



Kuva 7.3. Röntgenin kuvaama polttoainepatja (UPM intranet 2014, kuva: Inray Oy 2014).

Mittausten aikana röntgenmittalaitteiston kuormakohtaisia tietoja verrattiin ämpäriotannalla saatuihin tietoihin. Röntgen mahdollisti kuorman tarkemman energiasisällön tarkastelun, jota voitiin verrata muilla tavoilla saatuihin tietoihin.

7.3.3 Taselaskenta

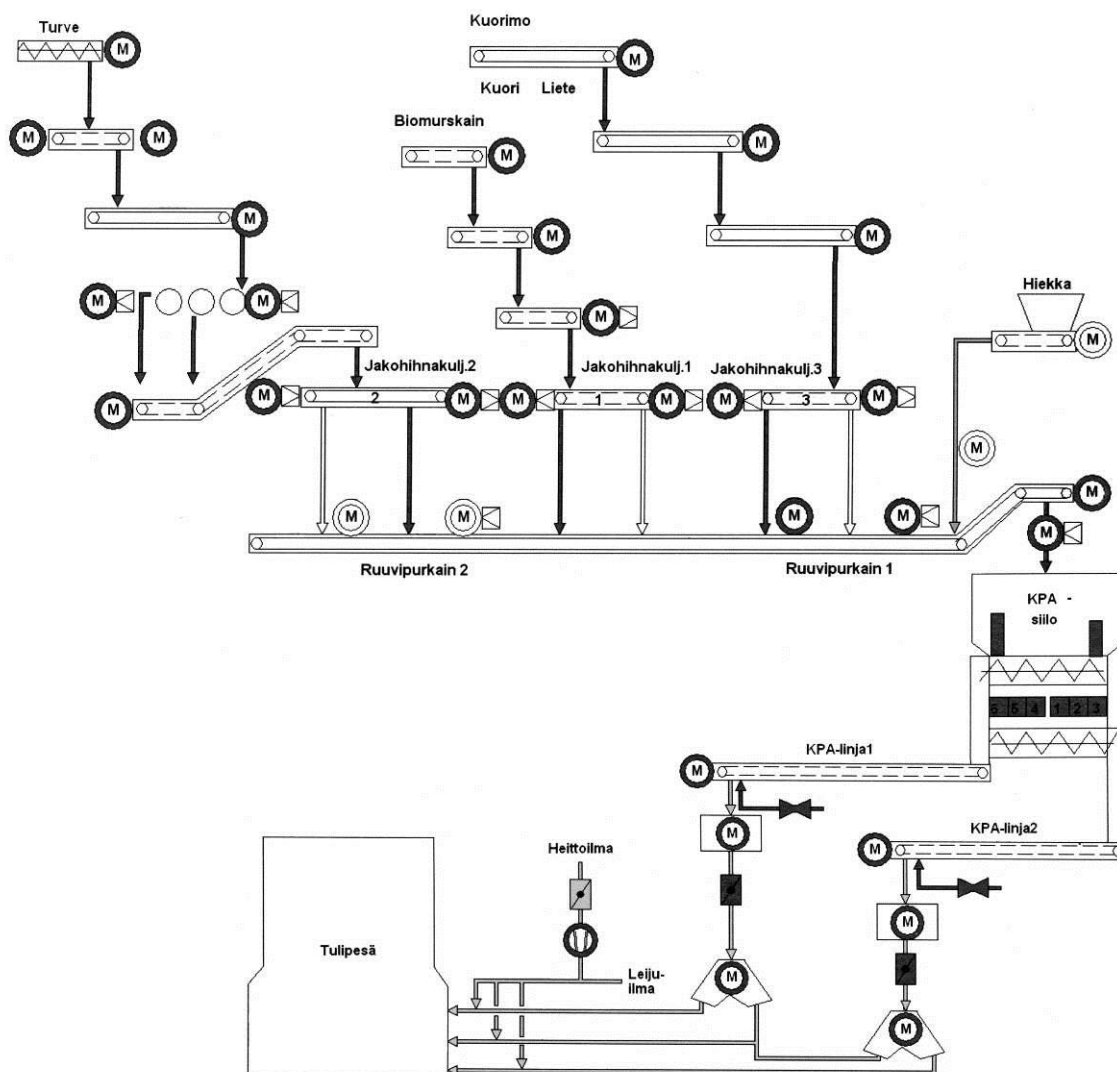
Toimitettujen polttoaineiden laatua pyrittiin selvittämään myös kattilan taselaskennan keinoin. Taselaskennan avulla määritettiin kattilaan menevät ja poistuvat lämpömäärät ja verrattiin niitä polttoaineiden sisältämiin lämpöarvoihin. Edellä kappaleessa 6 esitettiin kattilan taselaskentaan käytettävät laskentatavat sekä vaadittavat tiedot. Kattiladata haettiin UPM:n kattilatietojärjestelmästä.

7.4 Kaipolassa poltettavat polttoaineet

Työn aikana Kaipolaan toimitettiin metsäpolttoaineista rankaa ja kokopuuta, kantoa sekä metsähakkuutähdettä. Turvetta toimitettiin päivittäin neljä kuormaa, jotka tulivat eri turvesoilta. Näiden lisäksi kattilassa hävitettiin mittausten aikana tehtaan sisältä prosesseista tulevia jätepolttoaineita, kuten kuorimolta tulevaa kuorta sekä lietettä, jossa on mukana siistausjätettä sekä biologiselta puhdistamolalta tulevaa puristettua massaa.

Metsäpolttoaineille käytettiin työn aikana UPM:n polttoainejärjestelmästä löytyviä lämpöarvoja. Turpeen, kuoren ja lietteen lämpöarvot määritettiin Lappeenrannassa UPM:n laboratoriossa kalorimetripommissa. Turpeen osalta jokaiselle toimittajalle määritettiin erikseen turvesuokohtainen lämpöarvo.

Polttoaineet syötettiin polttoainevarastoon omiin kasoihin, josta ne voitiin ottaa halutussa suhteessa kattilaan. Kuvassa 7.4. on esitettynä polttoaineiden syötön prosessikaavio.



Kuva 7.4. Kaipolan voimalaitoksen polttoaineiden syöttö.

8 POLTTOAINEIDEN LAADUN MITTAUSTU- LOKSET

Polttoaineiden mittaukset suoritettiin 10.–12.3.2014 ja varsinainen mittausjakso kattiladatan keräykselle suoritettiin 10.3.2014 kello 14:00 ja 13.3.2014 kello 23:00 välisenä aikana. Polttoaineiden laatuun vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin kappaleessa 2. Näytteenottoa ja sen tekniikoita esiteltiin kappaleessa 3 sekä mittausten aikana käytetyt menetelmät kappaleessa 7. Laadun määrittämiseen ja laskentaan esitettiin kappaleissa 4 ja 6 laskentakaavoja, joita sovelletaan laadun määrittämisen yhteydessä. Polttoaineiden kuormakohtaisessa laadun- ja energiamäärän tarkastelussa keskitytään pääosin metsäpolttoaineisiin.

8.1 Kosteus

Polttoaineista määritettiin kosteus neljällä eri menetelmällä polttoainejakeittain. Polttoaineen sisältämä kosteus vaikuttaa suoraan sen teholliseen lämpöarvoon. Liitteessä 10 on esitettynä mittausten aikana saadut kosteudet mittauspöytäkirjoissa kunkin polttoainejakeen osalta eri mittausmenetelmillä. Senfit BMA:n ilmoitettu kosteus on kuuden kuormasta otetun yksittäisnäytteen keskiarvo. Keskimääräiset kosteudet on laskettu painotettuna keskiarvona kuorman painon mukaisesti yhtälöllä (38)

$$M_{tot} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i M_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (38)$$

missä m on kuorman massa

M on kosteus

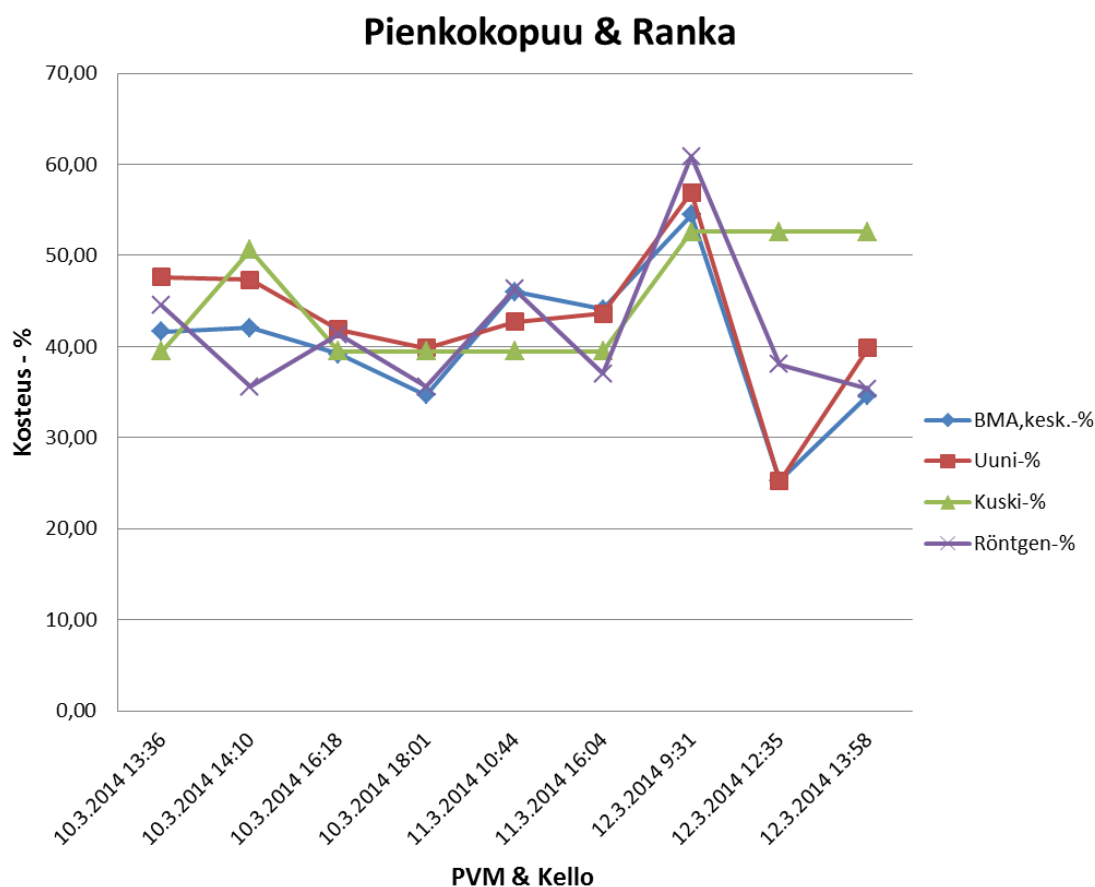
n on kuormien lukumäärä. (Saarenrinne 2010, s. 17.)

8.1.1 Pienkokopuu ja ranka

Pienkokopuun ja rangan keskimääräinen kosteusvaihtelu eri mittausmenetelmien välillä oli melko pientä, johtuen kappaleessa 2 esitettyihin väitteisiin, joissa pienkokopuun ja rangan laadun voidaan olettaa olevan melko tasaista. Taulukossa 8.1. on esitetty keskimääräiset kosteudet, jotka ovat painotettu kuorman painon mukaisesti yhtälöllä (38). Kuvassa 8.1. on esitettynä mitatut kosteuden pienkokopuussa ja rangassa eri mittausmenetelmillä.

Taulukko 8.1. Painotettu keskikosteus pienkokopuussa ja rangassa.

| Mittausmenetelmä | Kosteus - % |
|------------------|-------------|
| Senfit BMA | 41,02 |
| Uuni | 43,28 |
| Kuski | 44,70 |
| Röntgen | 41,95 |

**Kuva 8.1.** Pienkokopuun ja rangan kosteus eri mittausmenetelmillä.

Pienkokopuun ja rangan osalta kosteusvaihtelut mittausmenetelmien välillä ovat keskimääräisesti melko pieniä, johtuen sen tasaisesta laadusta. Kaikkien kuormien keskimääräinen kosteusvaihtelu mittausmenetelmien välillä oli $\pm 10,94$ %. Suurin poikkeama havaittiin 12.3.2014 kello 12:35 vastaanotetussa kuormassa, jossa kuljettajan ottama päivän kokoomanäyte näytti 52,60 % ja työssä määritetty uuninäyte kuormalle 25,22 %. Näin mittausmenetelmien väliseksi eroksi tuli 27,38 %. Kostein kuorma oli selkeästi 12.3.2014 kello 9:31 mitattu kuorma, jossa kosteus nousi keskimäärin eri mittausmenetelmillä 56,21 %:iin, joka selittyy peittämättömällä kasalla, josta kuorma oli haettu.

Verrattaessa taulukon 8.1. keskimääräisiä mittaustuloksia kappaleessa 2.1.2 esitettyihin kosteuksiin pienkokopuun ja rangan osalta muissa tutkimuksissa, voidaan päätellä, että polttoaineen laatu oli hieman kosteampaa kuin keskimäärin. Keskimääräistä kor-

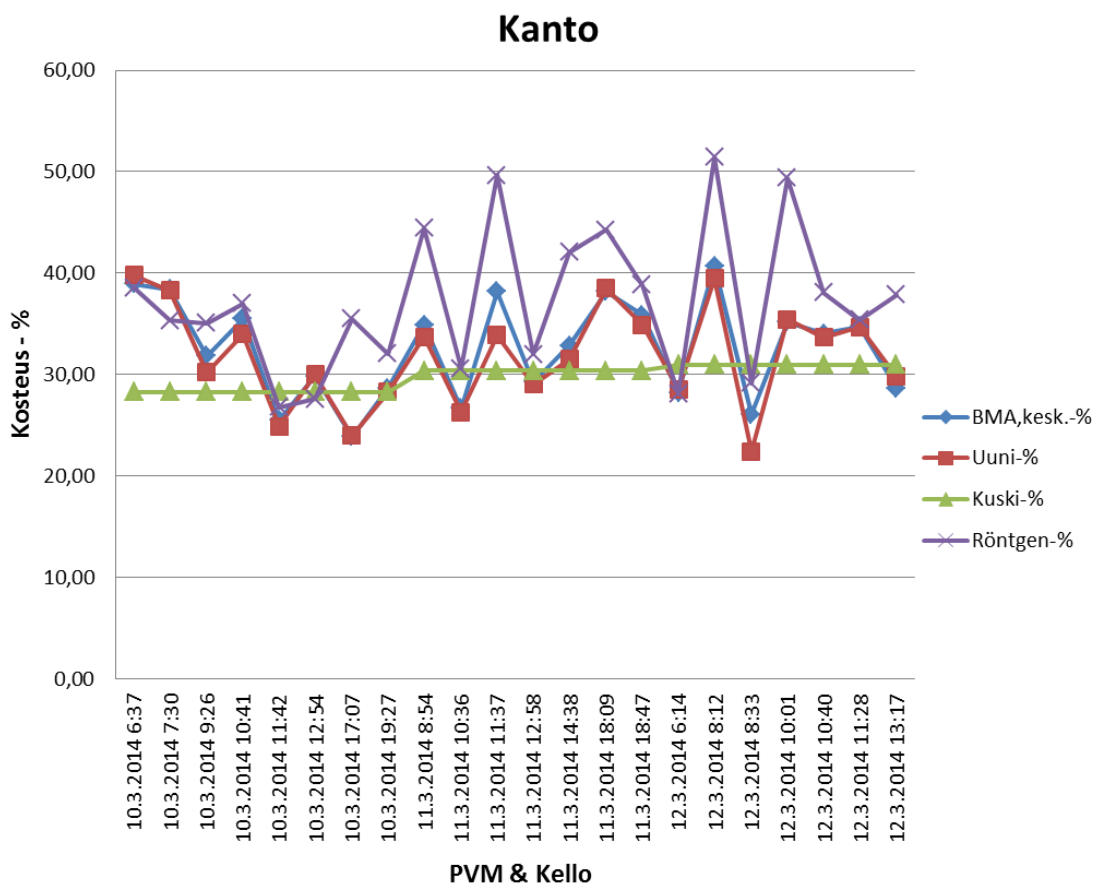
keammat kosteudet johtuvat pitkälti vuoden ajasta. Pienkokopuun ja rangan mukana tuleva lumi ja jää vaikuttavat merkittävästi kosteuteen.

8.1.2 Kanto

Kannon kosteusmäärittämissä havaittiin hieman pienkokopuuta ja rankaa suuremmat poikkeamat riippuen määrittämis menetelmästä. Kannon mukana tulevat epäpuhtaudet se-
littävät osin mittausmenetelmien eroja. Epäpuhtauksia mitatuissa polttoaineissa tarkas-
tellaan kappaleessa 8.2. Taulukkoon 8.2. on koottu yhtälön (38) mukaiset painotetut
keskikosteudet kuormissa eri mittausmenetelmillä, josta voidaan havaita kuljettajan
ottamien näytteiden ja röntgenin mittaamien kosteuksien eron olevan 7,92 %. Kuvassa
8.2. on esitetty kaikkien kuormien kosteudet eri mittausmenetelmillä.

Taulukko 8.2. Painotettu keskikosteus kannossa.

| Mittausmenetelmä | Kosteus - % |
|------------------|-------------|
| Senfit BMA | 33,04 |
| Uuni | 32,41 |
| Kuski | 29,89 |
| Röntgen | 37,81 |



Kuva 8.2. Kannon kosteus eri mittausmenetelmillä.

Tarkasteltaessa kuvaa 8.2. voidaan havaita menetelmien välisten erojen vaihtelevan suuresti. Keskimäärin mittausten väliset erot olivat 9,26 %. Suurin poikkeama voidaan havaita 12.3.2014 kello 8:12 mitatussa kuormassa, jossa kuljettajan määrittämä kosteus oli 31,00 % ja röntgenillä saatu kosteus 51,45 %, jossa poikkeamaksi tuli 20,45 %. Kyseinen kuorma oli myös kostein mitattu kanto kuorma työn aikana.

Mittausten aikana määritetyt keskimääräiset Senfit BMA:n, uuninäytteiden sekä kuljettajan kosteudet ovat hieman alhaisempia kuin kappaleessa 2.2. esitetyt muissa tutkimuksissa saadut kosteudet kannolle.

8.1.3 Metsähakkuutähde

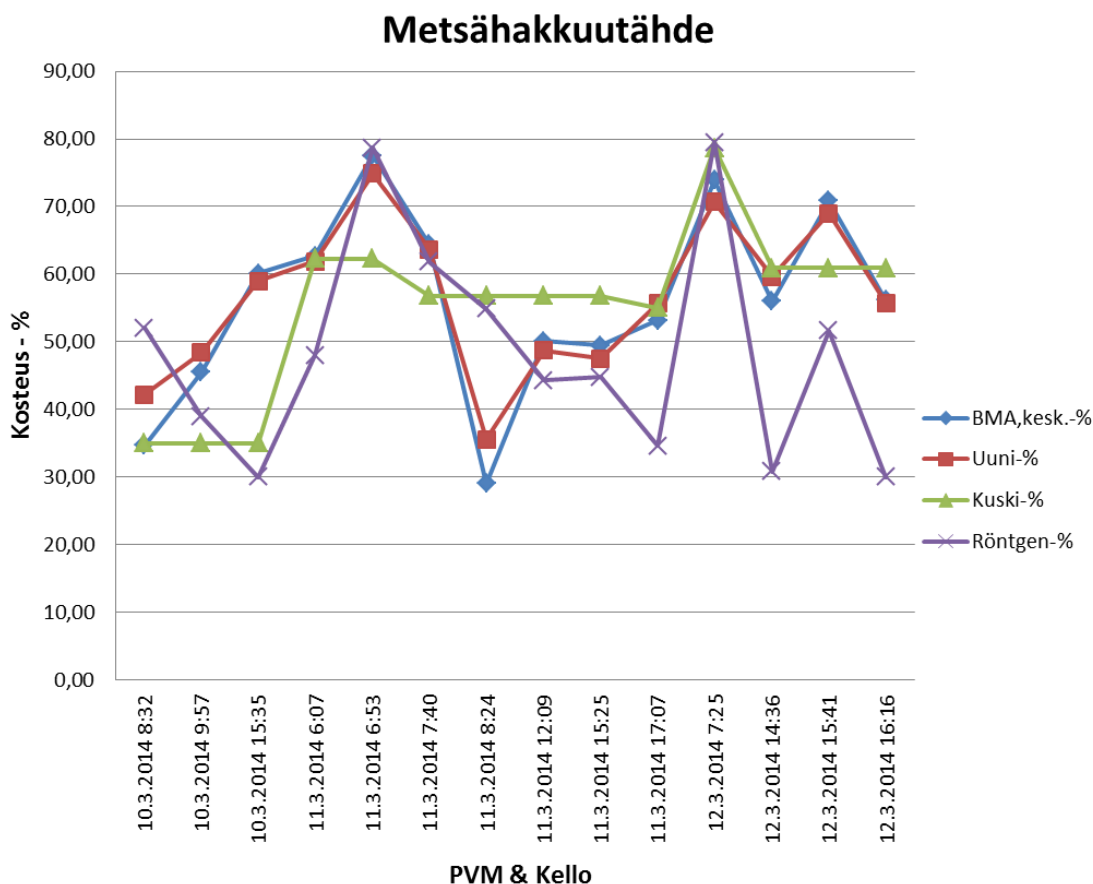
Metsähakkuutähteen mittaustuloksista voidaan havaita, että vaihtelut eri mittausmenetelmien välillä ovat kannon tavoin melko suuret. Taulukkoa 8.3. tarkasteltaessa, yhtälön (38) mukainen painotetun keskikosteuden vaihtelu mittausmenetelmien välillä on 7,92 %. Metsähakkuutähteen keskimääräinen kosteus on siis huomattavasti pienkokopuuta ja rankaa sekä kantoa korkeampi. Kuvassa 8.3. on esitetty kosteusmittausten tulokset eri mittausmenetelmillä metsähakkuutähteelle.

Taulukko 8.3. Painotettu keskikosteus metsähakkuutähteessä.

| Mittausmenetelmä | Kosteus - % |
|------------------|-------------|
| Senfit BMA | 57,15 |
| Uuni | 57,63 |
| Kuski | 55,96 |
| Röntgen | 49,71 |

Kuvasta 8.3. voidaan havaita kosteusvaihtelun olevan melko suurta mittausmenetelmien välillä. Keskimääräinen kosteusvaihtelu kuormissa oli 18,69 %, joka on merkittävän suuri verrattuna pienkokopuun ja rangan sekä kannon mittauksiin verrattuna. Suuria eroavaisuuksia esiintyi kolmessa kuormassa, joissa mittausmenetelmästä riippuen kosteus poikkeama oli yli 30 %.

Verrattaessa taulukon 8.3. keskimääräisiä kosteuksia kappaleessa 2.1.1 esitettyihin tuloksiin, voidaan havaita, että mittausten aikana saadut kosteudet ovat merkittävästi korkeampia keskiarvoihin verrattuna. Kahdessa toimitetussa kuormassa 11.3.2014 kello 6:53 ja 12.3.2014 kello 7:25 kosteus oli mittausmenetelmästä riippuen lähes 80 %. Huomion arvoista kuormissa oli, että ne olivat peittämättömiä sekä niiden mukana oli merkittävä määrä lunta ja jäätä, jotka voitiin havaita paljaalla silmällä.



Kuva 8.3. Metsähakkuutähteen kosteus eri mittausmenetelmillä.

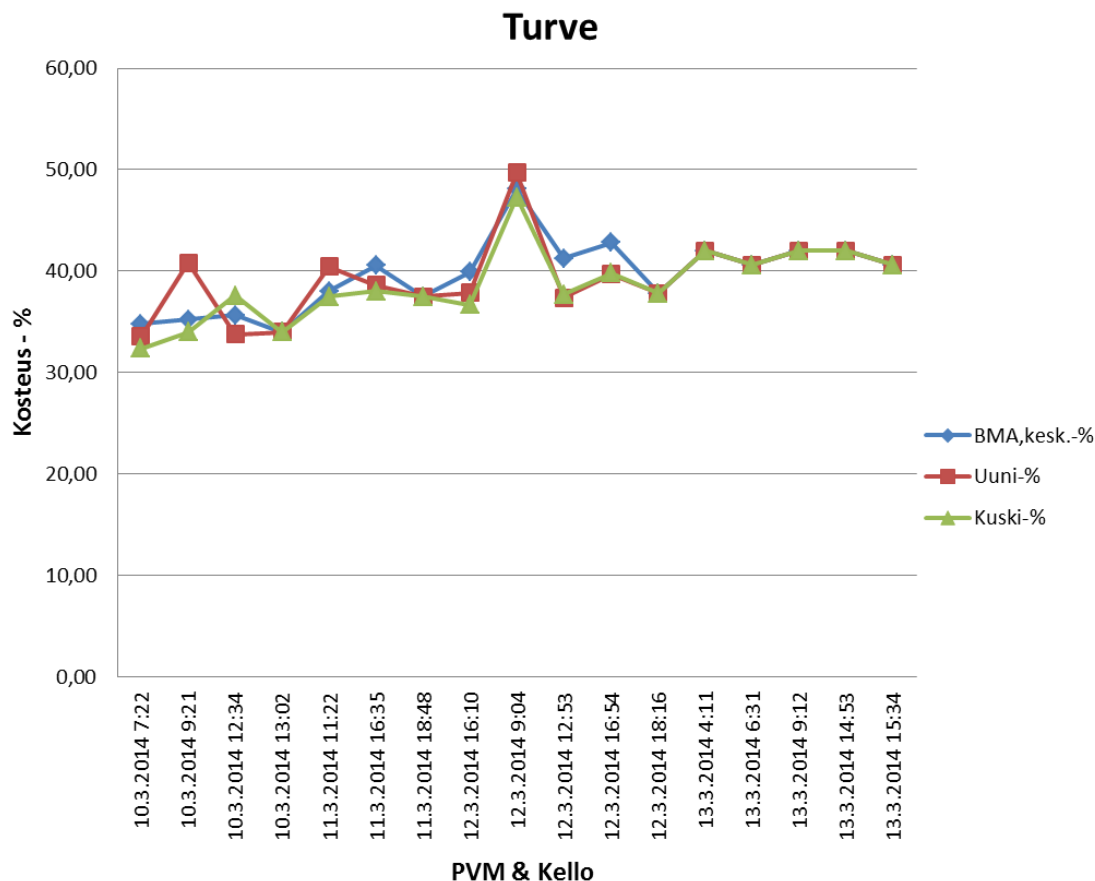
8.1.4 Turve

Turpeen kosteus määritettiin kolmella eri tapaa – yksittäisnäytteet Senfit BMA pikakosteusmittarilla, yksittäisnäytteistä muodostettu kokoomanäyte uunikuivausmenetelmällä sekä kuljettajien ottamalla päivän kokoomanäytteellä. Turpeen purkupaikasta johtuen polttoainenäytteet otettiin purun yhteydessä kuormasta putoavasta virrasta kappaleessa 3 esitetyllä tavalla.

Taulukon 8.4. perusteella voidaan jo havaita selvästi, että turpeen kosteus vaihtelee vähän mittausmenetelmien välillä. Näin voidaan myös todeta kuvan 8.4. perusteella, jossa on esitetty turpeen kosteusvaihtelu eri mittausmenetelmien välillä.

Taulukko 8.4. Painotettu keskikosteus turpeessa.

| Mittausmenetelmä | Kosteus - % |
|------------------|-------------|
| Senfit BMA | 39,56 |
| Uuni | 39,34 |
| Kuski | 38,68 |



Kuva 8.4. Turpeen kosteus eri mittausmenetelmillä.

8.1.5 Kuori ja liete

Kaipolan voimalaitoksella kuorta ja lietettä hävitetään polttamalla leijukattilassa. Paperitehtaan prosessien jätteinä syntyvät kuori ja liete ovat merkittäviä voimalaitoksen toimivuuden kannalta niin taloudellisesti kuin ekologisesti tarkasteltaessa. Voimalaitoksen kannalta ne ovat haastavia polttoaineita erityisesti niiden korkean kosteuspitoisuuden vuoksi.

Taulukossa 8.5. on esitetty kuoren kosteusvaihtelu ja taulukossa 8.6. on esitetty lietteen kosteusvaihtelu mittausten aikana. Kuoren sekä lietteen näytteet otettiin kuljettimilta putoavasta virrasta. Kuoren kosteus analysoitiin sekä Senfit BMA:lla, että uunissa. Lietteen kosteus analysoitiin paperitehtaan laboratoriossa. Kosteus on määritetty keskimäärin kolmen lietepuristimen massavirtojen suhteen avulla.

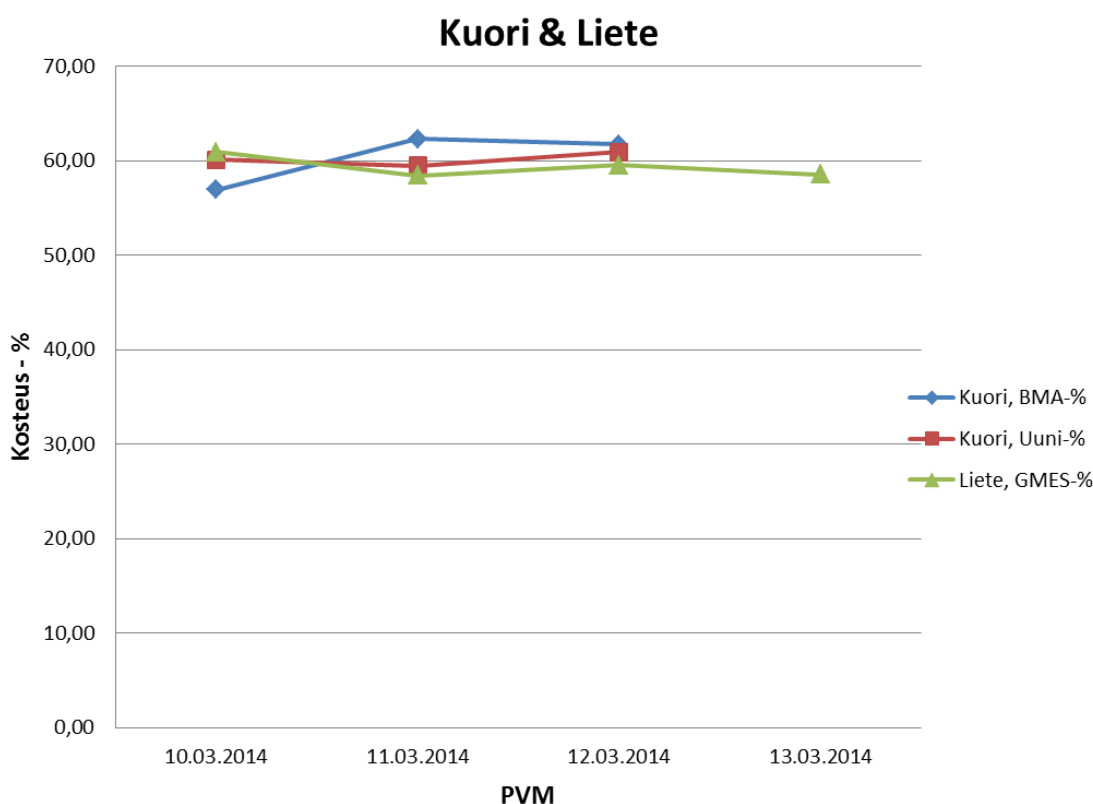
Taulukko 8.5. Kuoren kosteusvaihtelu mittausten aikana.

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | Uuni-% |
|-----------|-----------------|-------|--------|
| 10.3.2014 | 109620,00 | 56,90 | 60,07 |
| 11.3.2014 | 95904,00 | 62,30 | 59,45 |
| 12.3.2014 | 52704,00 | 61,70 | 60,91 |

Taulukko 8.6. Lietteen kosteusvaihtelu mittausten aikana.

| Päiväys | Nettopaino (kg) | GMES-% |
|-----------|-----------------|--------|
| 10.3.2014 | 113501,15 | 60,92 |
| 11.3.2014 | 268325,07 | 58,40 |
| 12.3.2014 | 254942,24 | 59,53 |
| 13.3.2014 | 251403,82 | 58,50 |

Kuvasta 8.5. voidaan havaita kosteuden olevan hyvin homogeeninen kuoren ja lietteen osalta. Vähäinen kosteusvaihtelu on myös merkittävä tekijä voimalaitoksen kannalta, sillä tasaisena pysyvä kosteus hävitettävissä polttoaineissa antaa paremmat mahdollisuudet sen polttamiseen leijukattilassa.

**Kuva 8.5.** Kuoren ja lietteen kosteus eri mittausmenetelmillä.

8.2 Epäpuhtaudet

Polttoaineiden epäpuhtauksina voidaan pitää inerttejä aineita, jotka tulevat polttoaineiden mukana voimalaitokselle. Inerttien aineiden osuus on merkittävä erityisesti kannossa ja nykyisten käytössä olevien menetelmien avulla niiden selvittäminen on lähes mahdotonta. Mittausten aikana epäpuhtauksia kuormien sisällä mitattiin röntgenin avulla. Kannon mukana tulevan inertin aineen osuus selvisi hyvin mittausten aikana, kun tarkasteltiin kuorman purun jälkeen kuormatilan pohjaa, jossa mullan, hiekan ja kivien peittämä kerros oli noin 10 cm paksu.

8.2.1 Pienkokopuu ja ranka

Pienkokopuun ja rangan mukana tulevien inerttien aineiden osuus mittauksissa oli varsin pieni. Röntgenin mitatessa jään epäpuhtauksiksi oli osassa lumisista ja jäisistä kuormista havaittavissa epäpuhtauksien kasvua. Mittausten aikana pienkokopuu ja rankakuormien mukana tuli 835,50 kg inerttiä ainesta eli noin 0,43 % kuormien nettopainosta. Taulukossa 8.7. on esitetty röntgenillä mitatut vierasaineet pienkokopuu- ja rankakuormissa.

Taulukko 8.7. Pienkokopuun ja rangan mukana tulleet vierasaineiden määrät röntgenillä mitattuna.

| PVM | Nettopaino (kg) | Vierasaineiden määrä (kg) | Vierasaineita - % |
|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| 10.3.2014 13:36 | 17580,00 | 176,99 | 1,01 |
| 10.3.2014 14:10 | 21520,00 | 16,28 | 0,08 |
| 10.3.2014 16:18 | 22700,00 | 98,95 | 0,44 |
| 10.3.2014 18:01 | 21840,00 | 53,61 | 0,25 |
| 11.3.2014 10:44 | 27240,00 | 87,56 | 0,32 |
| 11.3.2014 16:04 | 27180,00 | 141,73 | 0,52 |
| 12.3.2014 9:31 | 24060,00 | 119,46 | 0,50 |
| 12.3.2014 12:35 | 17160,00 | 39,88 | 0,23 |
| 12.3.2014 13:58 | 19440,00 | 101,04 | 0,52 |
| Yht. | 198720,00 | 835,50 | 0,43 |

8.2.2 Kanto

Kannon mukana tulevien epäpuhtauksien määrä on merkittävä tekijä voimalaitoksien kannalta. Inerttien aineiden määrä vaikuttaa myös porttihintaan, sillä sen osuus kuormasta voi olla jopa 20 % (Halonen 2013). Taulukossa 8.8. on esitetty mittausten aikana kantokuormien mukana tulleet epäpuhtaudet. Mittausten aikana suurin inerttien aineiden osuus kuormasta mitattiin 10.3.2014 kello 6:37 tuulleesta kuormasta, jonka vierasaineiden määrä oli 2380,32 kg ja osuus koko kuorman painosta 10,70 %. Keskimäärin kanto kuormien mukana tuli 3,53 % inerttiä ainesta. Kaikkiaan palamatonta ainesta mitattiin 15175,57 kg nettopainosta.

Taulukko 8.8. Kannon mukana tulleet vierasaineiden määrät röntgenillä mitattuna.

| PVM | Nettopaino (kg) | Vierasaineiden määrä (kg) | Vierasaineita - % |
|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| 10.3.2014 6:37 | 22240,00 | 2380,32 | 10,70 |
| 10.3.2014 7:30 | 18020,00 | 782,34 | 4,34 |
| 10.3.2014 9:26 | 15400,00 | 560,60 | 3,64 |
| 10.3.2014 10:41 | 19640,00 | 643,42 | 3,28 |
| 10.3.2014 11:42 | 14080,00 | 338,43 | 2,40 |
| 10.3.2014 12:54 | 17020,00 | 293,71 | 1,73 |
| 10.3.2014 17:07 | 15620,00 | 287,21 | 1,84 |
| 10.3.2014 19:27 | 17420,00 | 302,62 | 1,74 |
| 11.3.2014 8:54 | 19120,00 | 607,72 | 3,18 |
| 11.3.2014 10:36 | 14320,00 | 251,55 | 1,76 |
| 11.3.2014 11:37 | 20660,00 | 1454,46 | 7,04 |
| 11.3.2014 12:58 | 16440,00 | 341,40 | 2,08 |
| 11.3.2014 14:38 | 17940,00 | 493,90 | 2,75 |
| 11.3.2014 18:09 | 20240,00 | 682,16 | 3,37 |
| 11.3.2014 18:47 | 24600,00 | 1053,67 | 4,28 |
| 12.3.2014 6:14 | 20960,00 | 636,20 | 3,04 |
| 12.3.2014 8:12 | 20480,00 | 1610,78 | 7,87 |
| 12.3.2014 8:33 | 15160,00 | 466,67 | 3,08 |
| 12.3.2014 10:01 | 21040,00 | 626,46 | 2,98 |
| 12.3.2014 10:40 | 23140,00 | 591,53 | 2,56 |
| 12.3.2014 11:28 | 19160,00 | 345,21 | 1,80 |
| 12.3.2014 13:17 | 19620,00 | 425,23 | 2,17 |
| Yht. | 412320,00 | 15175,57 | 3,53 |

Verrattaessa taulukossa 8.8. esitettyjä mittaustuloksia Halosen (2013) esittämiin, voidaan todeta kantojen olleen mittausten aikana normaalia puhtaampia. Halosen (2013) kantotutkimuksessa saatiin inerttien aineiden osuudeksi keskimäärin 11,29 % kanto-kuorman painosta. Verratessa taulukon 8.8. tuloksiin eroa syntyi 7,76 %, jolla on merkittäviä vaikutuksia kuormien energiasisältöön suhteen.

8.2.3 Metsähakkuutähde

Metsähakkuutähteiden osalta inerttien aineiden osuus on myös melko pieni. Taulukossa 8.9. on esitettyinä mittausten aikana saadut vierasaineiden määrät metsähakkuutähdekuormissa. Mittausten aikana saatu kokonaismäärä oli 4154,05 kg eli 1,33 % nettopainosta.

Taulukko 8.9. Metsähakkuutähteiden mukana tulleet vierasaineiden määrät röntgenillä mitattuna.

| PVM | Nettopaino (kg) | Vierasaineiden määrä (kg) | Vierasaineita - % |
|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| 10.3.2014 8:32 | 22320,00 | 629,00 | 2,82 |
| 10.3.2014 9:57 | 18600,00 | 175,06 | 0,94 |
| 10.3.2014 15:35 | 21220,00 | 559,60 | 2,64 |
| 11.3.2014 6:07 | 24500,00 | 491,56 | 2,01 |
| 11.3.2014 6:53 | 27200,00 | 242,80 | 0,89 |
| 11.3.2014 7:40 | 24500,00 | 134,70 | 0,55 |
| 11.3.2014 8:24 | 20400,00 | 800,66 | 3,92 |
| 11.3.2014 12:09 | 21860,00 | 146,79 | 0,67 |
| 11.3.2014 15:25 | 20640,00 | 306,13 | 1,48 |
| 11.3.2014 17:07 | 24800,00 | 214,40 | 0,86 |
| 12.3.2014 7:25 | 25380,00 | 178,81 | 0,70 |
| 12.3.2014 14:36 | 23880,00 | 38,58 | 0,16 |
| 12.3.2014 15:41 | 28740,00 | 168,81 | 0,59 |
| 12.3.2014 16:16 | 17500,00 | 67,15 | 0,38 |
| Yht. | 321540,00 | 4154,05 | 1,33 |

Röntgenin erottelukyky ei vielä riitä jään tunnistamiseen muista kiinteistä aineista, joka osittain selittää metsähakkuutähteiden mukana tulleita palamattomia aineksia. Tästä johtuen osa palamattomasta aineksesta metsähakkuutähteissä muodostui jäästä.

8.3 Tehollinen lämpöarvo

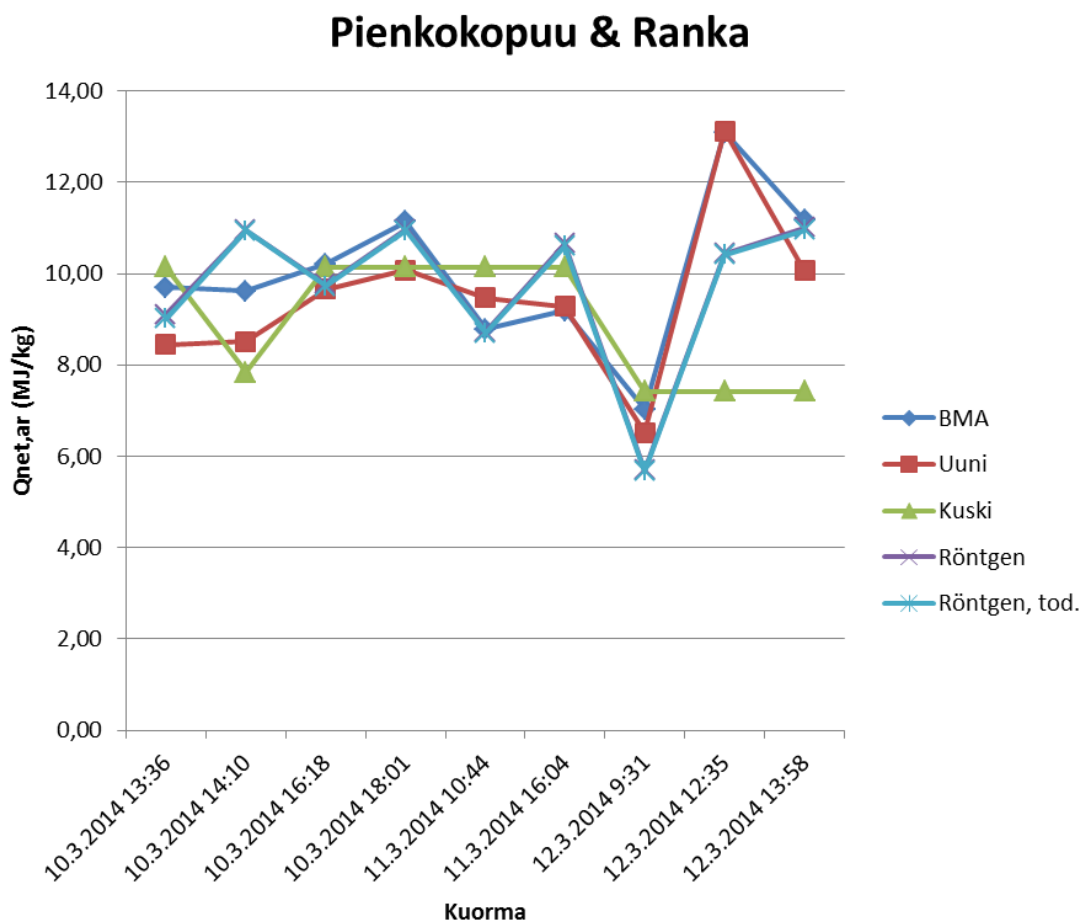
Polttoaineiden tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa voidaan määrittää, kun tiedetään kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo. Mittausten aikana metsäpolttoaineille käytettiin UPM:n polttoainejärjestelmän mukaisia lämpöarvoja kuiva-aineelle. Turpeen, lietteen sekä kuoren kuiva-aineiden teholliset lämpöarvot määritettiin UPM:n laboratoriossa Lappeenrannassa.

Tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa voidaan laskea kappaleessa 4.3 esitettyjen kaavojen avulla kuiva-aineen tehollisen lämpöarvon perusteella. Liitteessä 11 on esitettyä metsäpolttoaineiden ja liitteessä 12 turpeen teholliset lämpöarvot saapumiskosteudessa mittausten aikana eri mittausmenetelmillä. Röntgenille on esitetty kaksi eri lämpöarvoa – ensimmäinen on yhtälöllä (6) laskettu lämpöarvo samoin kuin muiden mittausten osalta ja toinen on energiamäärästä laskettu lämpöarvo, jossa inertit aineet on huomioitu.

8.3.1 Pienkokopuu ja ranka

Pienkokopuun ja rangan tehollinen lämpöarvo mittausten aikana oli keskimäärin 9,06 ja 9,83 MJ/kg välillä riippuen mittausmenetelmästä. Kuvassa 8.6. on esitettyä tehollisen

lämpöarvon vaihtelu graafisesti. Verrattaessa mittauksissa saatuja tuloksia liitteessä 1 esitettyihin lämpöarvoihin (7 - 11 MJ/kg), on keskimäärin lämpöarvot hyvin samaa luokkaa.

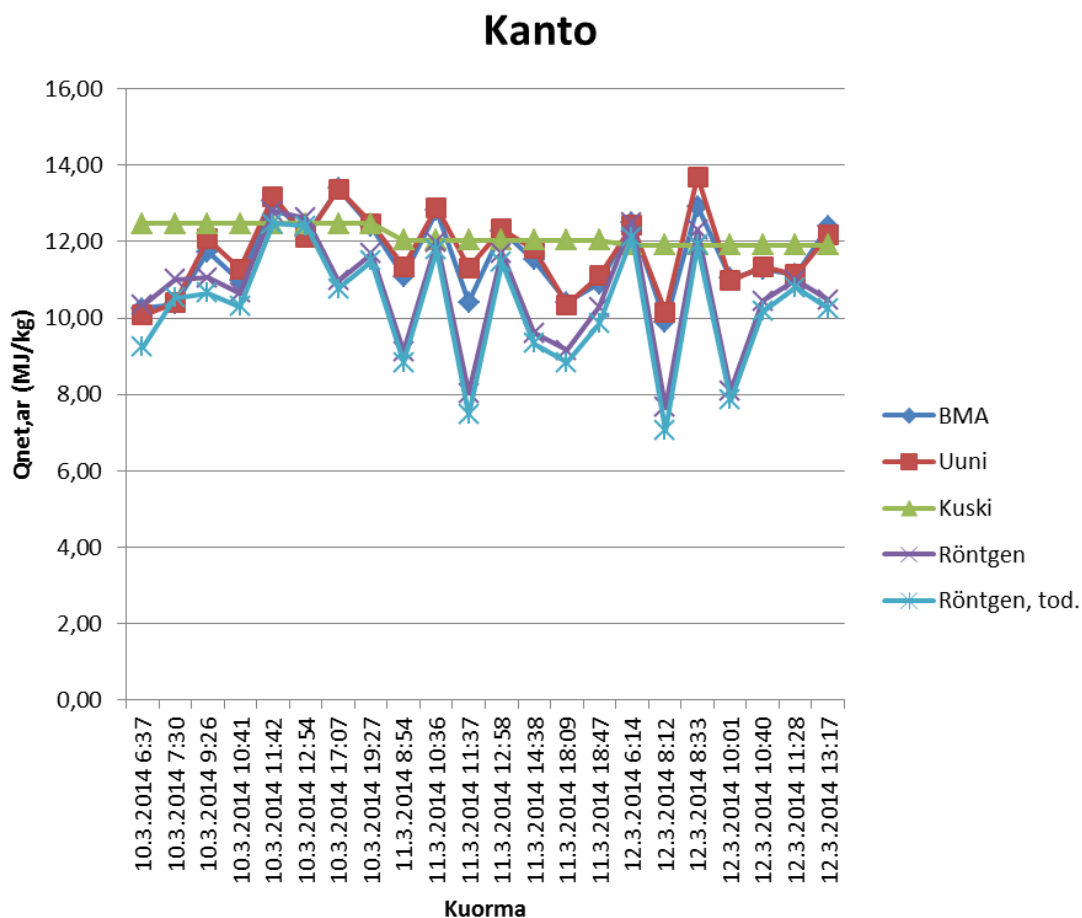


Kuva 8.6. Tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa pienkokopuussa ja rangassa.

Tarkasteltaessa kuvaa 8.6. voidaan selkeästi erottaa yhden kuorman poikkeavan selkeästi. Kuorman kosteus todettiin kappaleessa 8.1.1 olevan myös poikkeava keskiarvosta, joka vaikuttaa suoranaisesti myös lämpöarvoon.

8.3.2 Kanto

Kannon keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumiskosteudessa mittausmenetelmästä riippuen oli 10,12 ja 12,14 MJ/kg:n välillä. Liitteessä 1 on esitetty kantohakkeen lämpöarvon vaihtelevan 8 ja 13 MJ/kg:n välillä. Mittaustuloksia voidaan pitää hyvin keskimääräisinä. Kuvassa 8.7. on esitetty mittausten aikana kannon teholliset lämpöarvot tulokosteudessa eri mittausmenetelmillä.

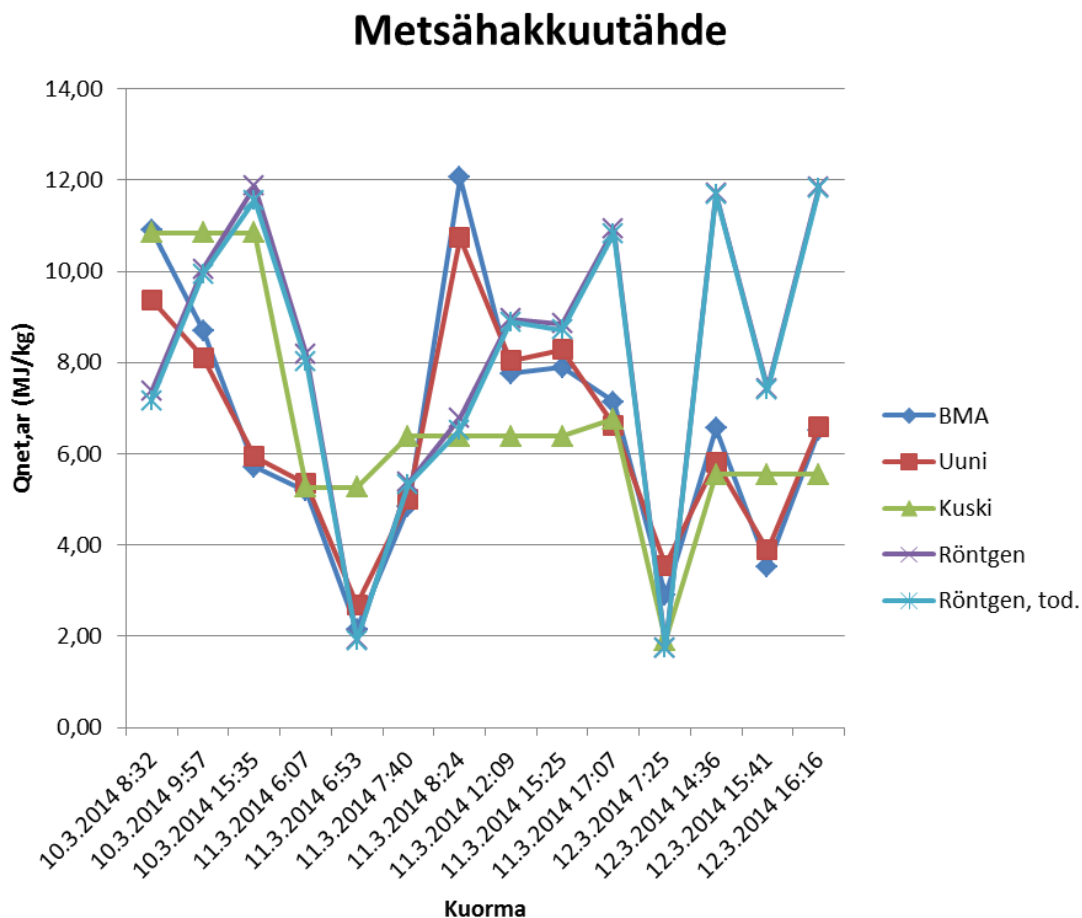


Kuva 8.7. Tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa kannossa.

Tarkasteltaessa kuvaa 8.7. voidaan nähdä kahden kuorman teholliset lämpöarvot poikkeuksellisen mataliksi röntgenmittauksessa. Matala lämpöarvo johtuu pitkälti niiden korkeasta kosteudesta sekä vierasainepitoisuudesta.

8.3.3 Metsähakkuutähde

Metsähakkuutähteelle teholliseksi lämpöarvoksi saatiin 6,22 ja 7,84 MJ/kg välille riippuen mittausten menetelmästä. Liitteessä 1 on metsähakkuutähteelle esitetty teholliseksi lämpöarvoksi saapumiskosteudessa 6 - 9 MJ/kg. Mittausten tulokset ovat siis hyvin keskimääräisiä kirjallisuuden arvoihin verrattuna, mutta ovat kuitenkin keskimääräisen lämpöarvon alarajoilla. Kuvassa 8.8. on esitettynä teholliset lämpöarvot saapumiskosteudessa eri mittausten menetelmillä metsähakkuutähteelle.

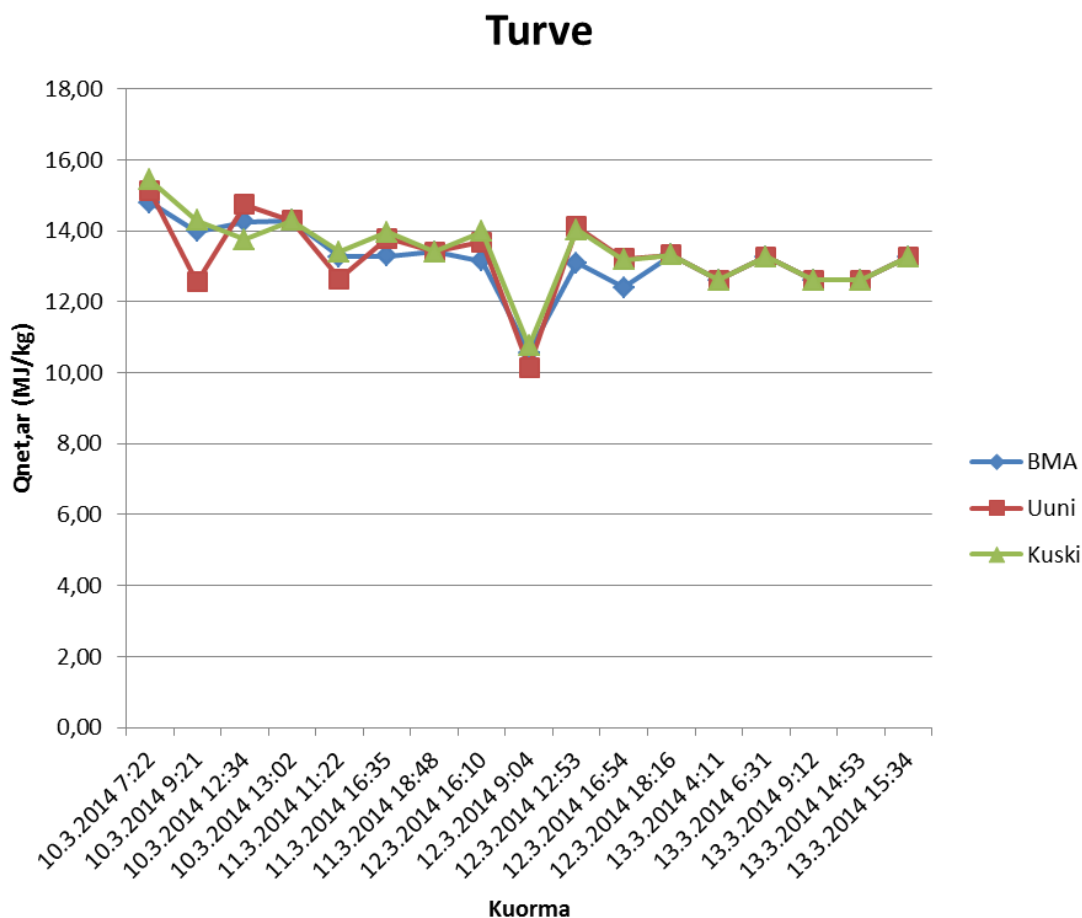


Kuva 8.8. Tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa metsähakkuutähteessä.

Kuvan 8.8. perusteella voidaan todeta röntgenmittausten vaihtelevan huomattavasti voimakkaammin kuormien välillä. 11.3.2014 kello 6:53 ja 12.3.2014 kello 7:25 toimitetuista kuormista on saatu huomattavasti alhaisemmat lämpöarvot kuin kirjallisuudessa esitetyt arvot. Vastaavasti parempia kuormia on havaittu jokaisena mittauspäivänä, mikä toisaalta kompensoi keskiarvoa.

8.3.4 Turve

Turpeen laatu mittausten aikana oli melko tasaista, kuten jo aiemmin kosteusmittauksiin perusteella voitiin todeta. Turpeelle määritettiin turvesuokohtaiset kuiva-aineen teholliset lämpöarvot, jotka on esitetty liitteessä 12. Kuvassa 8.9. on esitetty mittausten aikana saadut teholliset lämpöarvot tulokosteudessa turpeelle.



Kuva 8.9. Tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa turpeessa.

Mittaustulosten perusteella keskimääräinen tehollinen lämpöarvo tulokosteudessa vaihteli mittaustavasta riippuen 13,18 ja 13,41 MJ/kg:n välillä. Kuvasta 8.9. voidaan nähdä mittaustulosten olevan hyvin samanlaisia, joka osittain kertoo turpeen laadun olevan hyvin tasaista. Pieni poikkeama voidaan havaita 12.3.2014 kello 9:04 toimitetussa kuormassa, jossa kosteus oli poikkeuksellisen korkea, noin 48 %.

8.3.5 Kuori ja liete

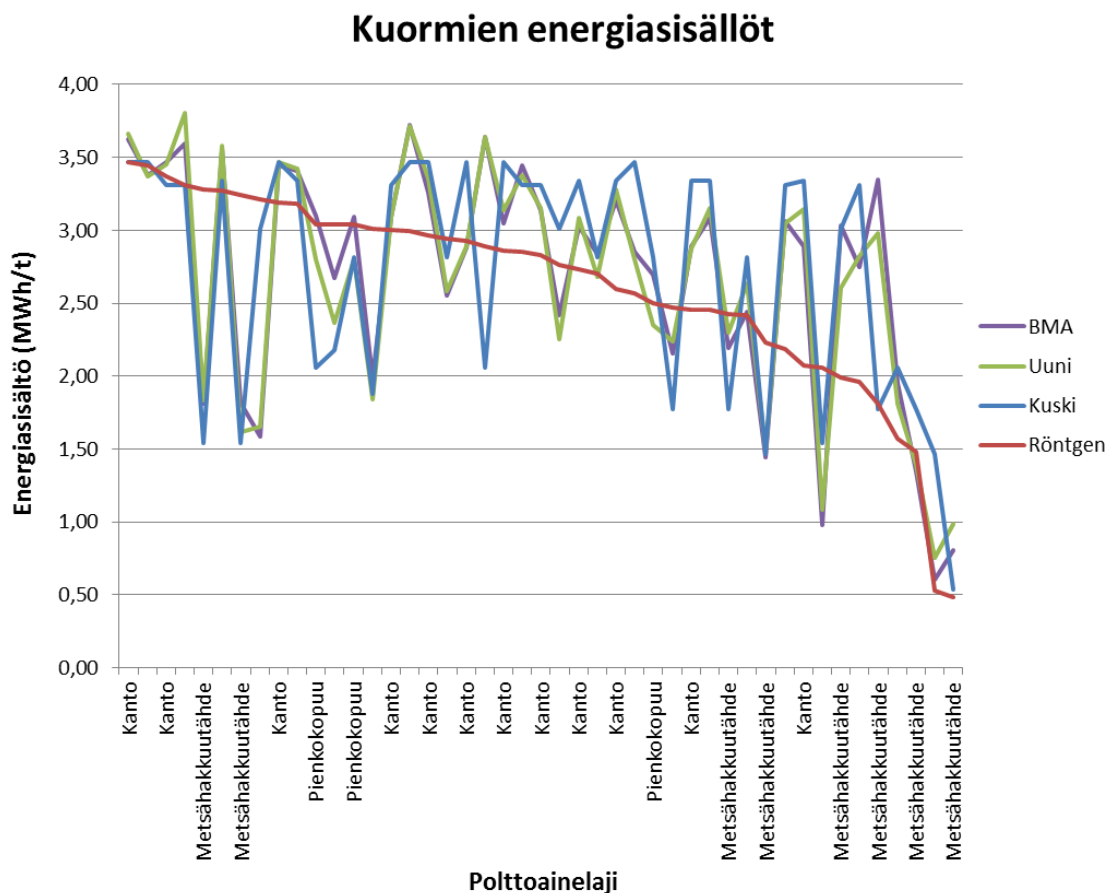
Kuoren ja lietteen näytteistä kerättiin kokoomanäyte laboratorioon, jossa niille määritettiin lämpöarvo. Taulukossa 8.10. on esitetty kuorelle ja lietteelle teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa sekä saapumiskosteudessa. Tarkastelemalla taulukkoa 8.10., voidaan todeta kuoren ja lietteen laadun pysyvän homogeenisena.

Taulukko 8.10. Kuoren ja lietteen teholliset lämpöarvot.

| Kuori | $Q_{\text{net,d}}$ (MJ/kg) | $Q_{\text{net,ar}}$ (MJ/kg) | |
|-----------|----------------------------|-----------------------------|------|
| | | BMA | Uuni |
| 10.3.2014 | 19,10 | 6,84 | 6,16 |
| 11.3.2014 | 19,10 | 5,68 | 6,29 |
| 12.3.2014 | 19,10 | 5,81 | 5,98 |
| Liete | $Q_{\text{net,d}}$ (MJ/kg) | $Q_{\text{net,ar}}$ (MJ/kg) | |
| 10.3.2014 | 10,16 | 2,48 | |
| 11.3.2014 | 10,16 | 2,80 | |
| 12.3.2014 | 10,16 | 2,66 | |
| 13.3.2014 | 10,16 | 2,79 | |

8.4 Kuorman energiasisältö

Kuorman energiasisällöllä tarkoitetaan kuromasta saatavaa energiamäärään, kun tunnetaan polttoaineen lämpöarvo. Energiasisältö voidaan määrittää kappaleessa 4.5 esitetyn yhtälön (8) avulla. Energiasisältö määritellään yhtälössä (8) koko kuormalle sen painon mukaisesti, joten tässä kappaleessa tarkastelemme polttoaineiden ja kuormien välisiä energiasisältöjä jakamalla koko kuorman energiamäärä sen painolla, jolloin saadaan yksiköksi energia per tonni. Kuvassa 8.10. on esitettyinä kaikki mittausten aikana toimitetut metsäpolttoainekuormat ja niiden energiasisällöt. Röntgenin energiasisällön laske-
misessa on otettu huomioon vierasaineiden määrät.



Kuva 8.10. Kuormien energiasisällöt eri mittausmenetelmillä polttoainelajeittain.

Tarkasteltaessa kuvaa 8.10., jossa kuormat ovat järjestettynä röntgenillä mitattujen kuormien paremmuusjärjestykseen, voidaan havaita koneellisella näytteenotolla otettujen BMA, Uuni sekä kuskinäytteiden energiasisältöjen olevan lähempänä toisiaan kuormakohtaisesti. Ne kuitenkin poikkeavat suuresti röntgenillä mitatusta energiasisällöstä, kun tarkastellaan kuorman kokosisältöä. Taulukossa 8.11. on esitetty mittauksen aikana toimitetut metsäpolttoaineiden energiamäärät eri mittausmenetelmillä mitattuna.

Taulukko 8.11. Metsäpolttoaineiden energiamäärät eri mittausmenetelmillä.

| Mittausmenetelmä | Pienkokopuu & ranka | Kanto | Metsähakkuutähde | Yhteensä |
|------------------|---------------------|---------|------------------|----------|
| | MWh | MWh | MWh | MWh |
| BMA | 542,51 | 1315,58 | 564,36 | 2422,46 |
| Uuni | 516,45 | 1331,01 | 555,44 | 2402,90 |
| Kuski | 500,21 | 1390,66 | 586,11 | 2476,98 |
| Röntgen | 529,58 | 1159,57 | 691,02 | 2380,18 |

8.5 Leijukattilan energiatase

Leijukattilalle muodostettiin energiatase mittausten ajalta sille aikavälille, jona mitatut polttoaineet poltettiin kattilassa. Kattilan tiedot kerättiin talteen kattilatietojärjestelmästä. Energiataseen laskemiseksi määritettiin aiemmin kappaleessa 6.2 periaatteet ja yhtälöt, joita tarvitaan energiavirtojen laskemiseen. Kattilan energiataseen avulla voidaan tarkastella polttoaineiden todellisia energioita suhteessa kattilasta saatavaan energiaan.

8.5.1 Savukaasupuoli

Leijukattilan savukaasupuolen laskuissa tarkastellaan tulipesään meneviä sekä savukaasujen mukana poistuvia lämpötehoja. Liitteessä 13 on esitetty tuntikeskiarvona kattilan savukaasupuolelle sisään menevät lämpötehot - polttoaineiden tehot eri mittausmenetelmillä, palamisilman tehot sekä kokonaistehot, jossa on laskettu yhteen polttoaineiden teho ja palamisilman teho.

Polttoaineiden syötettävät määrät kattilaan on optimoitu niiden suhteen mukaisesti siten, että on otettu huomioon kuvassa 7.4. esitettyjen ruuvipurkaimien kuormitukset. Ruuvipurkain 1 syöttää turvetta, kuorta sekä lietettä ja ruuvipurkain 2 metsäpolttoaineita. Polttoaineiden lämpötehot on laskettu kunkin mittausmenetelmän mukaisesti saadulla painotetulla keskiarvolla tehollisesta lämpöarvosta saapumiskosteudessa. Painotetun keskiarvon laskemiseksi esitettiin kappaleessa 8.1 yhtälö (38), jota voitiin soveltaa myös lämpöarvon laskemiseen. Polttoaineiden lämpötehot voidaan laskea yhtälön (31) avulla, joka esitettiin kappaleessa 6.2.1. Polttoaineita syötettiin kattilaan mittausten aikana yhteensä noin 4 120 000 kilogrammaa.

Palamisilman lämpötehon laskemiseksi muodostettiin liitteessä 7 esitettyjen palamisilman tuntuvien entalpioiden perusteella taulukon 8.12. mukaiset polynomisovitteet. Sovitteiden avulla pystyttiin määrittämään keskimääräinen palamisilman teho, kun palamisilman virtaus ja lämpötila voitiin lukea kattilatietojärjestelmästä. Palamisilman lämpötehon laskemiseksi esitettiin kappaleessa 6.2.1 yhtälö (32).

Taulukko 8.12. Palamisilman tuntuvan entalpian laskemiseen käytettävät polynomisovitteet.

| Lämpötila, T (MJ/kmol) | Sovite H_{mt} (MJ/kmol) |
|------------------------|--|
| $T \leq 7$ | $H_{mt} = -0,0003T^4 + 0,0069T^3 - 0,0218T^2 + 3,497T - 8,7098$ |
| $T > 7$ | $H_{mt} = 7 \times 10^{-06}T^4 - 0,0009T^3 + 0,0493T^2 + 3,3604T - 9,2329$ |

Savukaasupuolelta poistuvina lämpötehoina voidaan pitää savukaasun hukcatehoa, säteily- ja johtumishäviöistä syntyvää hukcatehoa sekä pohjatuhkan mukana poistuvaa lämpötehoa. Liitteessä 14 on esitettynä savukaasupuolelta poistuvat lämpötehot tuntikeskiarvona.

Savukaasun hukcateholle muodostettiin palamisilman tavoin liitteessä 7 esitetyistä savukaasun tuntuvista entalpioista polynomisovitteet, jotka on esitetty taulukossa 8.13. Savukaasujen virtaus ja lämpötila haettiin kattilatietojärjestelmästä tuntikeskiarvona

mittausten ajalle. Hukkateho laskettiin kappaleessa 6.2.1 esitetyn yhtälön (33) mukaisesti.

Taulukko 8.13. Savukaasun tuntevan entalpian laskemiseen käytettävät polynomisovitteet.

| Lämpötila, T (MJ/kmol) | Sovite H_{mt} (MJ/kmol) |
|------------------------|---|
| $T \leq 7$ | $H_{mt} = 0,0269x^2 + 3,5697x - 9,0541$ |
| $T > 7$ | $H_{mt} = 6 \times 10^{-06}T^4 - 0,0009T^3 + 0,0529T^2 + 3,8005T - 11,49$ |

Säteily- ja johtumishäviöiden laskemiseen on sovellettu kappaleen 6.2.1 yhtälöä (34). Mittausten aikana arvoitiin säteily- ja johtumishäviöiden olevan noin 2 % kattilan rakenteesta johtuen. Pohjatuhkan mukana poistuva lämpöteho on melko pieni verrattuna kattilan kokonaistehoon. Sen laskemiseksi sovellettiin yhtälöä (35), jossa pohjatuhkan ominaislämpökapasiteettina käytettiin kirjallisuudessa esitettyä arvoa 1,00 kJ/kgK. Poistettavan pohjatuhkan määrä mittausten aikana oli 6550 kilogrammaa.

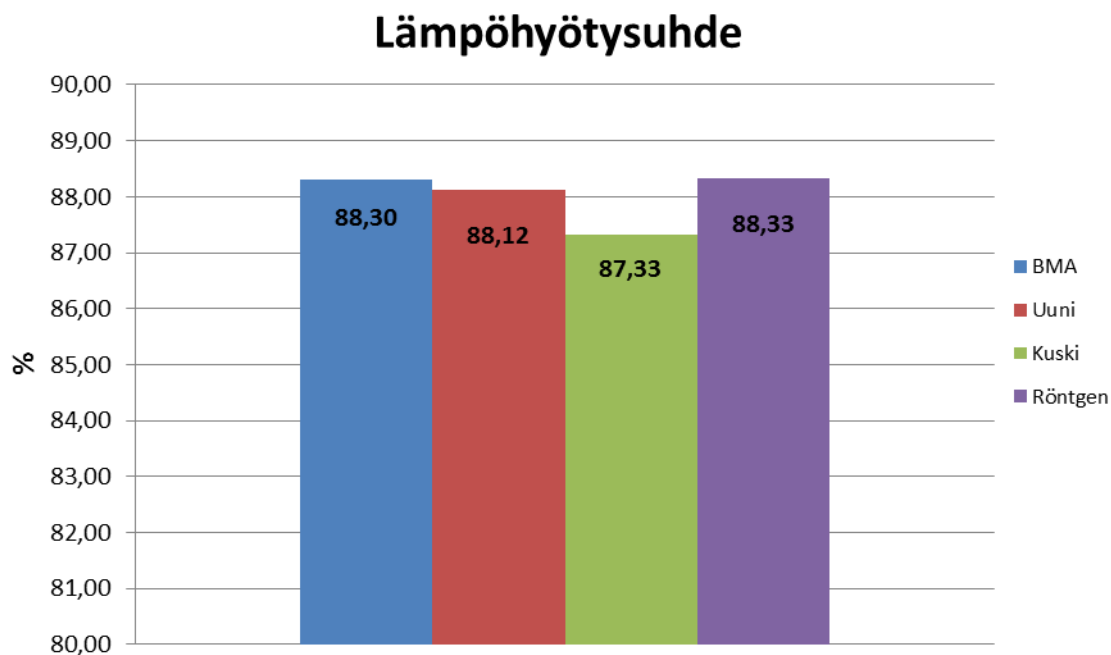
8.5.2 Vesi-höyrypiiri

Vesi-höyrypiirin laskuissa tarkastellaan kattilan sisään menevän veden höyrystämiseen vaadittavaa tehoa, joka voidaan laskea entalpian muutoksesta. Veden höyrystämiseen vaadittava teho voidaan laskea sisään menevän syöttöveden ja ulos tulevan höyryn entalpioiden erotuksesta kappaleessa 6.2.2 esitetyn yhtälön (37) mukaisesti. Liitteessä 15 on esitettynä tuntikeskiarvona mittausten ajalle höyryyn siirtyvä lämpöteho sekä kattilatietojärjestelmästä vaadittavat lämpötilat, paineet sekä höyryn virtaukset. Entalpia kyläläiselle vedelle voidaan lukea liitteessä 9 esitetyistä taulukosta ja tulistetun höyryn entalpia liitteestä 9 entalpia-entropia -diagrammista.

8.5.3 Hyötysuhde

Hyötysuhdetta voidaan käsitellä leijukattilan osalta kahdella eri tavalla – lämpöhyötysuhteena ja kattilahyötysuhteena. Lämpöhyötysuhde sekä kattilahyötysuhde voidaan laskea normaalin lämpövoimakoneen hyötysuhteen tapaan. Lämpöhyötysuhde kertoo kuinka paljon kattilaan syötettävästä mitatusta polttoainetehosta pystytään hyödyntämään. Kattilahyötysuhde taas kertoo kuinka paljon sisään syötettävästä energiasta kattila pystyy teoreettisesti hyödyntämään, kun otetaan kattilan häviöt huomioon.

Lämpöhyötysuhde voidaan määrittää kappaleessa 6.2.3 esitetyn yhtälön (38) avulla. Ulostulevana lämpötehona voidaan laskennassa pitää korkeapainehöyryn lämpötehoa, joka laskettiin kappaleessa 8.5.2. Korkeapainehöyry voidaan hyödyntää turbiinissa sähkön tuottamiseen sekä paperikoneilla paperin kuivaukseen. Kattilan sisään syötettävät lämpötehot ovat polttoaineiden sisältämä lämpöteho sekä palamisilman lämpöteho. Nämä laskettiin myös aiemmin kappaleessa 8.5.1. Lämpöhyötysuhteet eri polttoaineiden mittausten menetelmillä on esitetty kuvassa 8.11.



Kuva 8.11. Kattilan lämpöhyötysuhde eri polttoaineen mittausten menetelmillä.

Kattilan hyötysuhde voidaan määrittää, kun tunnetaan kattilan häviöt. Kattila häviöihin kuuluu kattilassa syntyvät johtumis- ja säteilyhäviöt, pohjatuhkan mukana poistuva lämpömäärä, savukaasun mukana hukattu lämpömäärä sekä jatkuvan ulospuhalluksen mukana menetetty höyryn lämpömäärä. Kattila häviöiden laskemiseksi esitettiin kappaleessa 6.2 yhtälöt, mitkä ovat laskettu liitteissä 14 ja 16. Kattilan hyötysuhde saadaan laskettua, kun jaetaan kattilan kehittämä höyrymäärä koko kattilan teholla. Kattilan teho saadaan, kun lasketaan kattilan kehittämään höyrymäärään mukaan häviöt. Kattilan hyötysuhteeksi saatiin mittausten aikana noin 91,50 %.

9 POLTTOAINEIDEN LAADUNTARKASTELU

9.1 Laadun vaikutus energiasisältöön

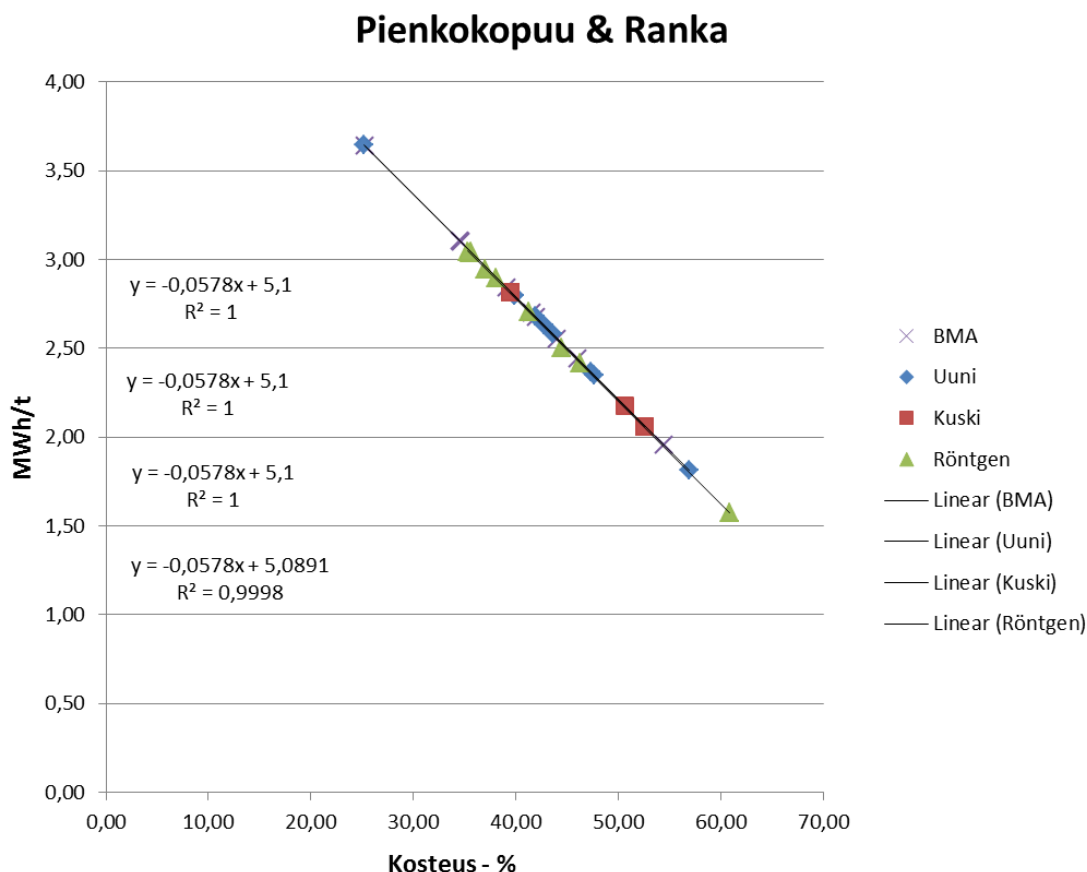
Polttoaineiden laadun vaihtelu vaikuttaa merkittävästi kuorman energiasisältöön. Laatuun vaikuttavat tekijät vaihtelevat merkittävästi niin kuorman sisäisesti kuin päiväkohtaisesti näytteissä.

9.1.1 Kosteus

Kosteus vaikuttaa polttoaineen teholliseen lämpöarvoon suoranaisesti, josta syystä sen merkitys kuorman energiasisältöön korostuu. Kuvissa 9.1.–9.3. on koottu mittausten aikana mitatut polttoaineet lajeittain ja muodostettu niille yhtälöt energiasisällön laske-
miseksi. Yhtälöt ovat esitettynä samassa järjestyksessä kuin kuvien oikealla puolella oleva taulukko mittausten menetelmän merkinnästä. Yhtälöiden alapuolella on esitettynä korrelaatio todellisen arvon ja yhtälön välillä.

BMA, uuni ja kuski – määritykset noudattavat samaa yhtälöä, sillä niiden energiasisältöön vaikuttaa ainoastaan kosteus ja tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa. Niiden energiasisältöön ei vaikuta vierasaineet, joita kyseisillä määritysmenetelmillä ei pystytä mittaamaan. Röntgenin energiasisältöön vaikuttaa myös vierasaineiden määrä kosteuden lisäksi, josta syystä röntgenillä mitatun kosteuden mukaan määritetty energiasisältö poikkeaa hieman muista määrityksistä.

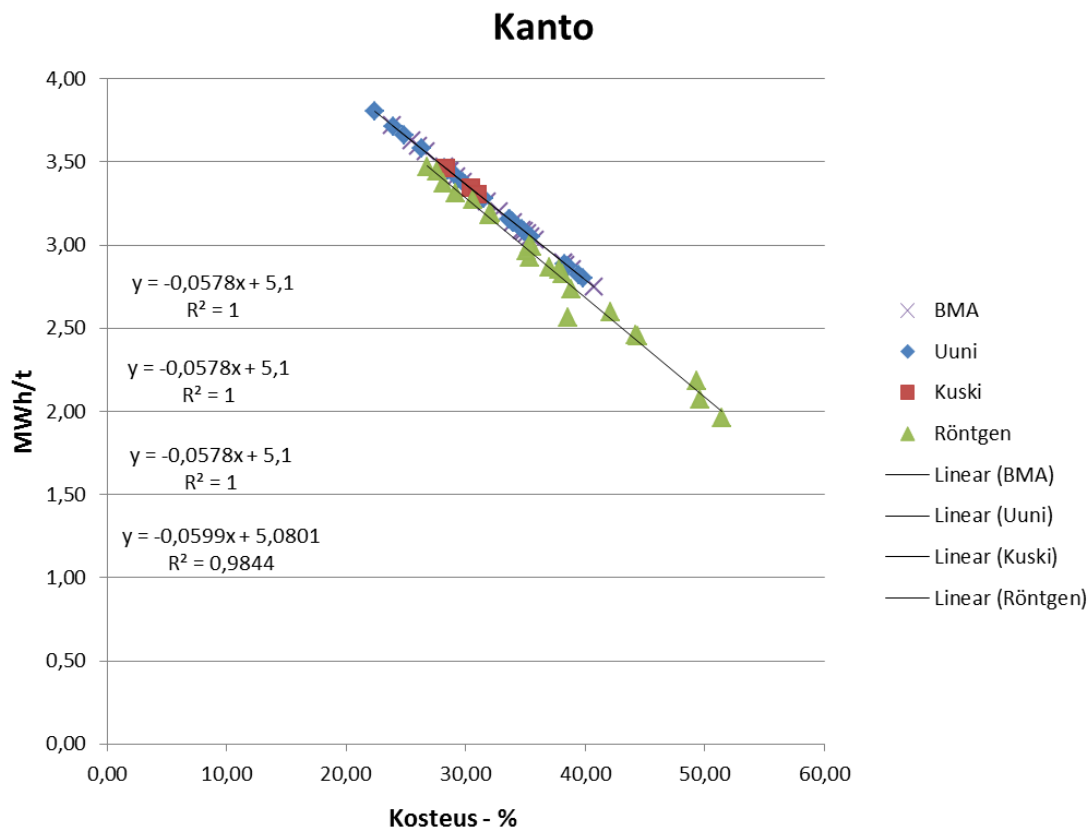
Pienkokopuu ja ranka kuormien energiasisältö kosteuden suhteen noudattaa hyvin lineaarista funktiota. Kappaleessa 8.2.1 voitiin havaita, että vierasainemäärät jäivät vähäisiksi, josta syystä kuvassa 9.1. korrelaatio kosteuden mukaisessa energiasisällön määrittämisessä pitää hyvin paikkansa. Röntgenmittausten perusteella saadun yhtälön mukainen korrelaatio käsinäytteillä saatuun energiasisällön arvoon poikkeaa 0,02 %, jota voidaan pitää lähes vastaavana kuin pelkällä kosteus määrityksellä saatua arvoa. Kuiva-aineesta määritettävä energiasisältö kosteuden mukaisesti korreloi hyvin pienkokopuun ja rangan osalta. Kulmakerroin on myös sama määritysmenetelmästä riippumatta, joten kosteuden vaihtelu ei vaikuta merkittävästi vierasaineiden määrään.



Kuva 9.1. Kosteuden vaikutus kuorman energiasisältöön pienkokopuussa ja rangassa.

Kuvassa 9.2. ovat esitettynä kantokuormat ja niiden kosteuden vaikutus energiasisältöön. Kappaleessa 8.2.2 esitettyjen vierasainemäärien perusteella voitiin nähdä, että niiden määrä oli merkittävästi suurempi kuin muilla metsäpolttoaineilla. Tarkasteltaessa kantokuormien energiasisältöä kosteuden suhteen voidaan havaita, että vierasaineiden määrä vaikuttaa myös kuorman energiasisältöön, kun se on otettu huomioon röntgenillä mitattaessa. Muilla mittausmenetelmillä saatu polttoaineiden energiasisältö noudattaa pienkokopuun ja rangen tavoin samaa funktiota.

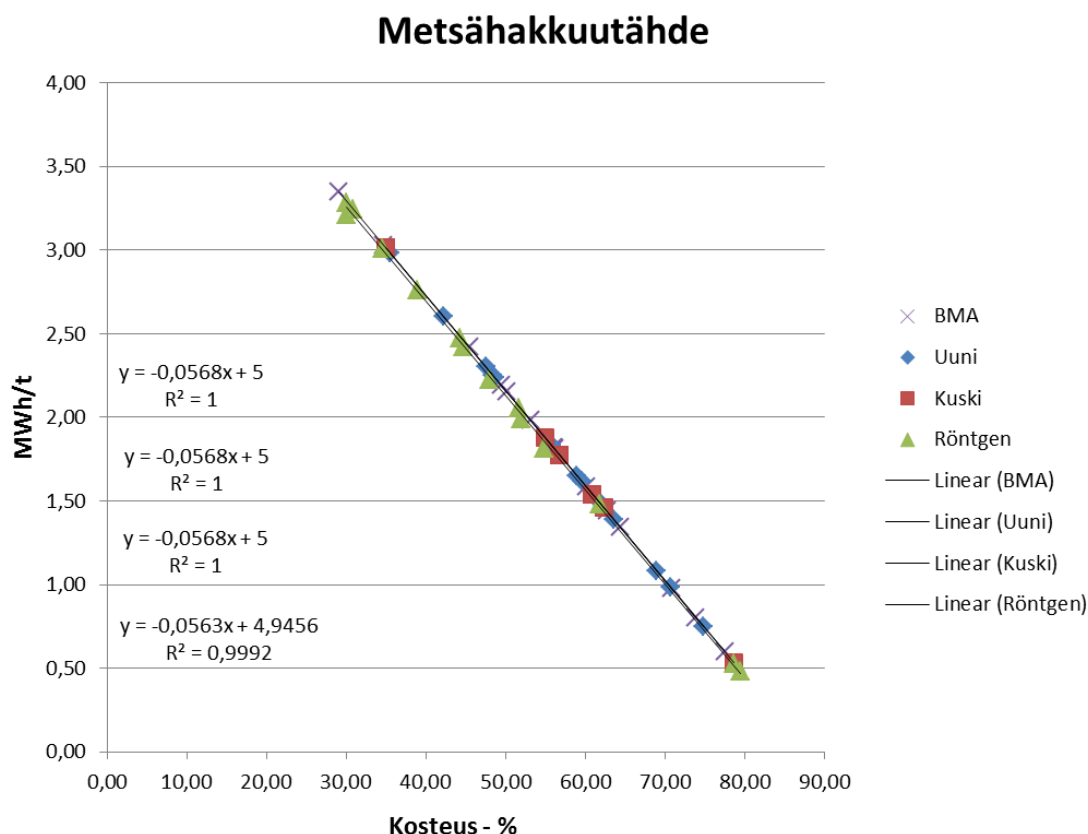
Röntgenmittausten perusteella muodostetun yhtälön korrelaatiosta voidaan nähdä, että kosteuden avulla saatu energiasisältö poikkeaa hieman käsinäytteiden mittauksista. Röntgenillä saadun korrelaation ollessa 98,44 % on energiasisällön poikkeama siis 1,66 % käsinäytteiden energiasisällöstä. Röntgenmittauksista saadun yhtälön kulmakerroin on hieman jyrkempi kuin käsinäytteiden otolla saatu. Tästä voidaan päätellä, että vierasaineiden määrä vaikuttaa jossain määrin kosteuteen kannossa. Sen näkyvyys käsinäyteotossa on heikko niin lajittumisen kuin harvan näytteenoton vuoksi. (Halonen 2013; Alakangas & Impola 2013, s. 37.)



Kuva 9.2. Kosteuden vaikutus kuorman energiasisältöön kannossa.

Tarkasteltaessa metsähakkuutähteiden mittausten perusteella muodostettua kuvaa 9.3. voidaan havaita, että jokaisen mittausmenetelmän perusteella voidaan melko tarkasti määrittää energiasisältö kosteuden suhteen. Tämä voidaan päätellä myös kappaleessa 8.2.3 esitettyjen vierasaineiden määrän perusteella, jotka pysyivät kohtuullisen pieninä. Röntgenillä mitattaessa metsähakkuutähdekuormia, voitiin selvästi havaita vierasainemäärien nousua, kun kuorma sisälsi runsaasti lunta ja jäätä. Tällöin osa kosteudesta merkittiin vierasaineisiin, jolloin vaikutus energiasisältöön tulee huomioitua. Ongelmana on kuitenkin jään ja lumen vaikutusta teholliseen lämpöarvoon saapumiskosteudessa, joka ei tule huomioiduksi, jos lumi ja jää yhdistetään vierasaineisiin.

Metsähakkuutähde kuormien kosteuden perusteella energiasisällölle muodostetusta yhtälöstä voidaan huomata, että kulmakertoimet ovat melko samat riippumatta mittausmenetelmästä. Vierasaineiden määrä ei siis vaikuta merkittävästi röntgenmittauksissa energiasisältöön. Korrelaatio röntgenmittauksessa verrattaessa energiasisältöä kosteuteen, voidaan havaita, että se pitää paikkansa 99,92 %:sesti. Tällöin poikkeama on keskimäärin 0,08 %, jota voidaan pitää tarkkana.



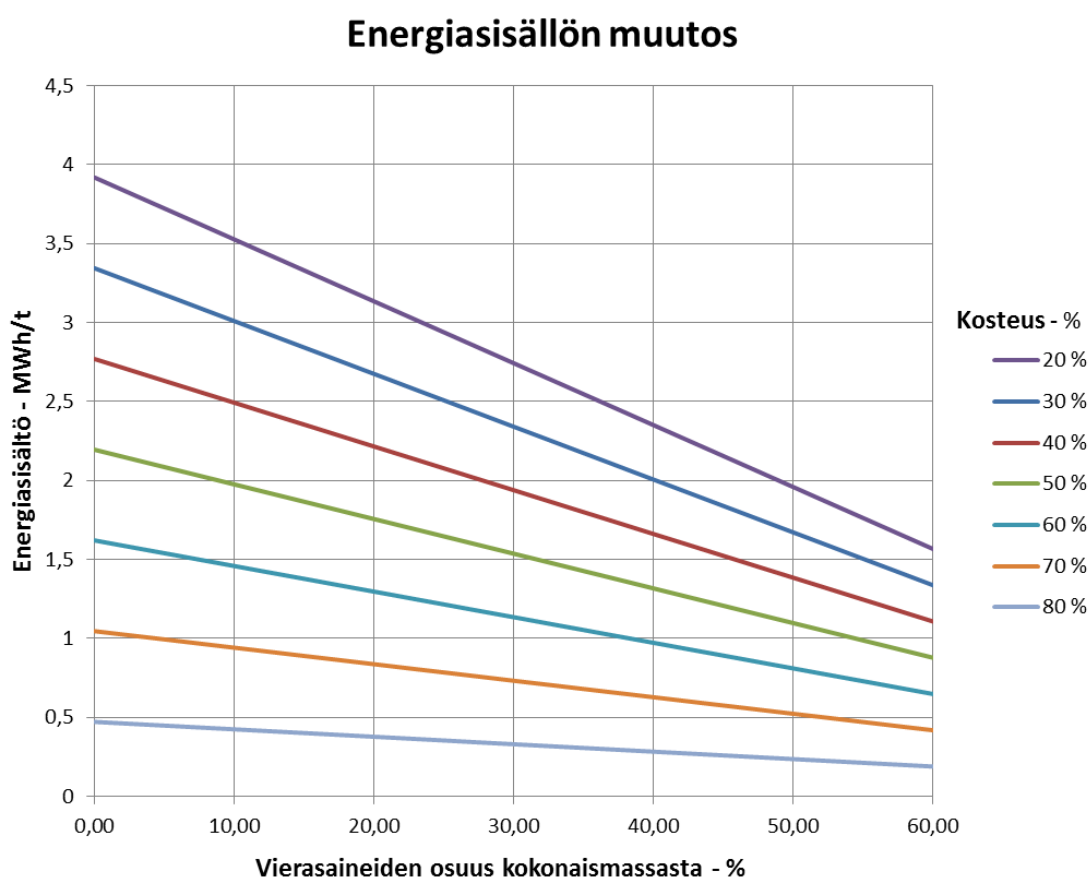
Kuva 9.3. Kosteuden vaikutus kuorman energiasisältöön metsähakkuutähteessä.

Mittaustuloksien perusteella muodostettujen yhtälöiden perusteella voidaan sanoa, että kuorman energiasisältö voidaan mitata melko tarkasti kosteuden perusteella. Korrelaatioiden perusteella kuorman energiasisällön tarkkuus on melko sama mittaussmenetelmästä riippumatta. Kanto kuormien osalta kuitenkin voitiin havaita, että inerttien aineiden määrä vaikuttaa merkittävästi kuorman energiasisältöön, jos se määritetään pelkän kosteuden perusteella. Vierasaaineiden määriä kuormasta on kuitenkin mahdotonta todeta ilman röntgenmittausta.

9.1.2 Vierasaineet

Vierasaineiden vaikutus energiasisältöön voi olla merkittävä sen määrästä riippuen. Aiemmin kappaleessa 8.2 tarkasteltiin vierasaineiden määriä mittausten aikana eri polttoainelajeissa. Voitiin havaita selkeästi, että kantokuormien vierasainemäärät olivat merkittävästi suurempia muihin polttoaineisiin verrattuna. Vierasaineiden määrän mittaaminen kuormasta röntgenillä on mahdollista, mutta muiden mittausmenetelmien avulla lähes mahdotonta koko kuormalle.

Kuvassa 9.4. on esitettyä energiasisällön muuttuminen kuormassa, kun otetaan sekä kosteuden muutos, että vierasaineiden määrä huomioon. Kuvaajassa kuorman energiasisällön laskemiseen on käytetty mittausten aikana metsäpolttoaineille keskimääräistä kuorman massaa (20724,00 kg) ja keskimääräistä lämpöarvoa (18,24 MJ/kg).



Kuva 9.4. Vierasaineiden ja kosteuden yhteisvaikutus energiasisältöön.

Tarkastelemalla kuvaajaa, voidaan havaita kosteuden vaikutuksen olevan merkittävä tekijä energiasisältöön. Kosteuden noustessa myös vierasaineiden määrän merkitys energiasisällön laskuun pienenee. Vierasaineiden määrä on suurimmillaan erityisesti kannon osalta, kuten todettiin aiemmin kappaleessa 8.2.

Mittausten aikana saatiin kannon keskimääräiseksi kosteudeksi 33,29 %, kun otetaan keskiarvo kaikkien mittausmenetelmien perusteella saadusta painotetusta keskiarvosta. Kuvasta 9.4. voidaan havaita, että mittausten aikana saadulla keskimääräisellä kannon kosteudella vierasaineiden määrä vaikuttaa merkittävästi kuorman energiasisäl-

töön. Halosen (2013) tutkimuksessa saatiin keskimääräiseksi vierasaineen määräksi kuormasta noin 11 % kuormasta. Kuvan 9.4. perusteella 11 % vierasainemäärällä ja 33,29 %:n kosteudella kuorman energiasisältö tippui samalla kosteudella olevaan puh-taaseen kuormaan verrattuna 0,34 MWh/t. Voidaan siis perustellusti sanoa, että vieras-aineiden määrä vaikuttaa merkittävästi kuorman energiasisältöön.

9.1.3 Toimitusketjun hallinta

Toimitusketjulla on merkittäviä vaikutuksia polttoaineen laatuun ja energiasisältöön. Kappaleessa 2 tarkasteltiin eri polttoainelaatujen ominaisuuksia, jossa voitiin havaita erityisesti kasan peittämällä ja toimitusajalla olevan merkittäviä vaikutuksia erityisesti kosteuteen. Vierasaineiden määrän on myös havaittu vähentyvän merkittävästi, kun kuivuminen tapahtuu tievarressa (Halonen 2013).

Mittausten aikana toimitettiin voimalaitokselle 45 metsäpolttoainekuormaan. Taulu-kossa 9.1. on koottu eri polttoainelajeittain mittausten ajalta vaaditut kuormat saman energiamäärän toimittamiseen, jos polttoaineen laatuun pystyttäisiin tekemään paran-nuksia toimitusketjun hallinnalla. Erityisesti kosteuteen voidaan vaikuttaa polttoaineen toimitusajankohdalla sekä varastoinnilla. Hyvä laatuisiin kuormiin on huomioitu 45 mitatusta kuormasta ainoastaan ne kuormat, joissa kuorman energiasisältö on ollut yli 2 MWh/t.

Taulukko 9.1. Kuormien määrä eri mittausmenetelmillä energiasisällön ollessa yli 2 MWh/t.

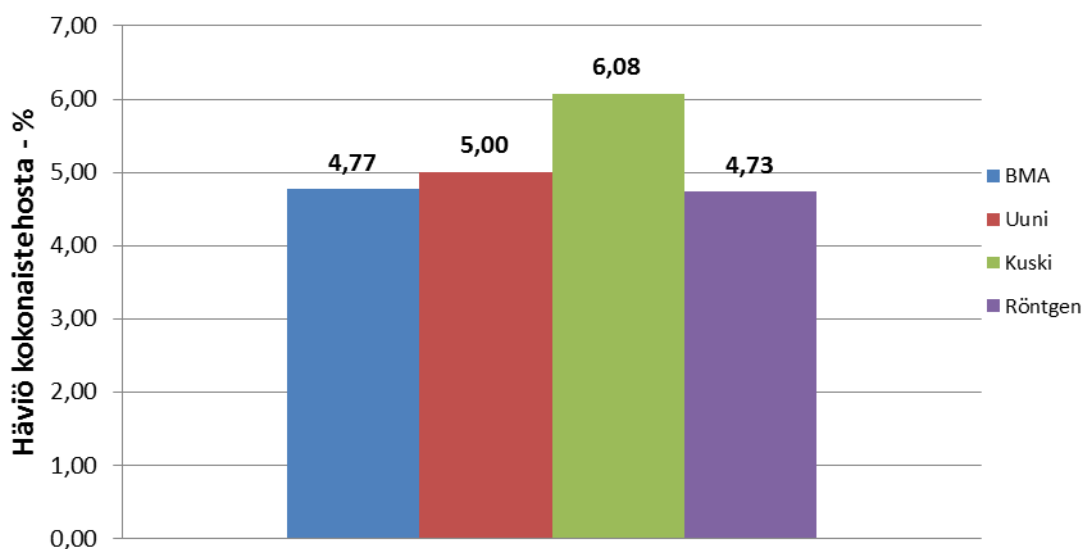
| | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|---------|
| Kuormien lukumäärä (yli 2 MWh/t) | 35 | 35 | 34 | 38 |
| Pienkokopuu & ranka | 8 | 8 | 9 | 8 |
| Kanto | 22 | 22 | 22 | 21 |
| Metsähakkuutähde | 5 | 5 | 3 | 9 |
| Kosteus keskimäärin (%) | 35,21 | 35,76 | 34,33 | 37,75 |
| Minimi kosteus (%) | 23,87 | 22,41 | 28,30 | 26,78 |
| Maksimi kosteus (%) | 50,13 | 48,69 | 52,60 | 51,67 |
| Kuorman energia keskimäärin (MWh) | 59,55 | 58,89 | 61,12 | 58,02 |
| Kuormien lukumäärä | 41 | 41 | 41 | 42 |

Tarkasteltaessa taulukkoa 9.1., voidaan havaita, että jokaisen mittausmenetelmän mukaan kannattavaa on toimittaa jokaista polttoainelajia. Keskimääräinen kosteus on noin 35 %:a kuormissa, joiden minimi ja maksimi kosteudet sijoittuvat myös melko samoihin arvoihin. Kuorman energiasisällössä erityisesti kuskimäärityksen osalta voi-daan havaita suurempi arvo verrattuna muihin menetelmiin. Viimeisellä rivillä esitetyt kuormien lukumäärät viittaavat mittausten aikana toimitettujen kuormien mukaiseen energiamäärän toimitukseen, jos pystyttäisiin optimoimaan kuormat siten, että energia-sisältö olisi yli 2 MWh/t. BMA:n, uunin ja kuskin mittausten perusteella olisi tarvinnut

toimittaa 4 kuormaa ja röntgenin mukaan 3 kuormaa vähemmän. Neljän päivän mittaus-
ten ajalta voidaan siis todeta, että toimitusketjun hallinnalla voitaisiin vähentää noin
yksi kuorma per vuorokausi, jos laatua ja toimituksia tarkkailtaisiin niin voimalaitoksen,
hankinnan kuin toimittajan osalta.

9.2 Kattilan energiataseen mukainen hävikki

Kattilan energiatase määritettiin mittaus-ten ajalta kappaleessa 8.5. Kappaleessa 5.1 esi-
tetyt termodynamiikan I:sen pääsäännön mukaan energia on häviämätöntä. Tarkastele-
malla kattilan energiatasetta, voidaan polttoaineiden mitattu energia todentaa kappalees-
sa 6.2.1 esitetyllä yhtälöllä (36). Yhtälön (36) avulla, saadaan polttoaineiden laadun
määrittämisessä tulevat häviöt näkyviin, kun tiedetään kattilan sisään ja ulos menevät
energiavirrat. Kuvassa 9.5. on esitettyä kattilan energiataseen avulla lasketut häviöt eri
mittausmenetelmillä.



Kuva 9.5. Polttoaineen laadunmittauksessa syntyneet tehohäviöt kokonaistehosta.

Kuvasta 9.5. voidaan havaita, että tarkimmat mittausmenetelmät ovat olleet röntgen
sekä yksittäisnäytteistä määritetty BMA keskiarvo. Myös yksittäisnäytteistä koottu ko-
koomanäyte on ollut melko lähellä röntgen ja BMA mittauksia. Kuskien ottamat näyt-
teet sen sijaan ovat poikenneet röntgen mittauksista merkittävästi, tuottaen laadun mää-
rittämisessä kattilan mukaan 1,34 % suuremman tehohäviön verrattuna röntgeniin.

Aiemmin kappaleessa 3.2 esitetyn kuvan 3.4. perusteella voitiin todeta, että näyttei-
den lukumäärällä on merkittävä vaikutus tarkasteltaessa mittaustarkkuutta (Alakangas &
Impola 2013, s. 55). Kuvasta 9.5. voidaankin havaita, että näytteiden määrä vaikuttaa
merkittävästi tarkkuuteen sekä polttoaineista saatavaan energiaa, joka näkyy selvästi
myös kattilan tehossa. Kappaleessa 8.5.3 esitetyssä kuvassa 8.11. voitiinkin havaita
lämpöhyötysuhteen olevan 1 % huonompi kuskin määrittämisellä kuin röntgenillä.

9.3 Mittausvirheet

Diplomityön mittausten aikana mittausvirheitä voidaan pitää merkittävänä tekijänä tulosten tarkastelussa, sillä jokaiseen mittaukseen sisältyy mittausepävarmuus. Suurten polttoainemäärien sekä monen eri käsittelyvaiheen ansiosta virheitä on tarkasteltu ainoastaan käsitteellisesti, sillä niiden tarkkamäärittäminen on mahdotonta. Niiden avulla on pyritty arvioimaan tuloksien paikkansa pitävyyttä ja tekemään johtopäätöksiä. (Saarenrinne 2010, s. 17.)

Mittausten alussa voimalaitoksella polttoainevarasto pyrittiin tyhjentämään mahdollisimman tyhjäksi ennen mitattujen polttoaineiden syöttämistä. Paperitehtaan täydestä ajosta johtuen, varastoon kuitenkin jäi vielä merkittävä määrä polttoainetta, sillä polttoaineen syöttö ei saanut katketa missään vaiheessa. Näin ollen tarkkoja polttoainemääriä lajeittain oli erittäin vaikea arvioida. Metsäpolttoaineiden määrät määritettiin portin vaa'alla, joten niiden määrä on melko tarkka. Polttoainevaa'an tarkkuus mittauksissa oli ± 50 kilogrammaa.

Muiden polttoainelajien määrät määritettiin polttoaineita syöttävien ruuvien kuormituksen sekä kolakuljettimien vaakapainojen perusteella, joten ne ovat suuntaa antavia. Muiden polttoaineiden arvot ovat samat jokaisen mittausmenetelmän osalta. Niiden vaikutus lopulliseen tulokseen näkyy ainoastaan kokonaishävikissä, joka on sama kaikkien mittausmenetelmien osalta.

Kuormat purettiin murskalle, jossa hävikki pyrittiin minimoimaan. Murskan ohi tipuneet rangat, kannot ja metsätähteet nostettiin murskalle pyöräkuormaajalla kuorman purun jälkeen, joten mittavirheet pysyivät tältä osin vähäisinä. Kuorman pohjalle jäänyt tavara tiputettiin vasta kuorman loppupunnituksen jälkeen, joten ainoastaan murskalle syötetty metsäpolttoaine otettiin huomioon laskennassa. Kuskit ohjeistettiin tarkoin mitauksia varten, mutta yksi polttoainekuorma jäi punnitsematta. 11.3.2014 klo 7:40 toimitettu metsähakkuutähde kuorma oli jäänyt punnitsematta vaa'alla. Kuorman referenssinä on käytetty edellistä saman rekan toimittamaa metsähakkuutähdekuormaa. Paino saattoi poiketa merkittävästi todellisesta painosta, mutta lopullisiin tuloksiin sen vaikutukset ovat pieniä.

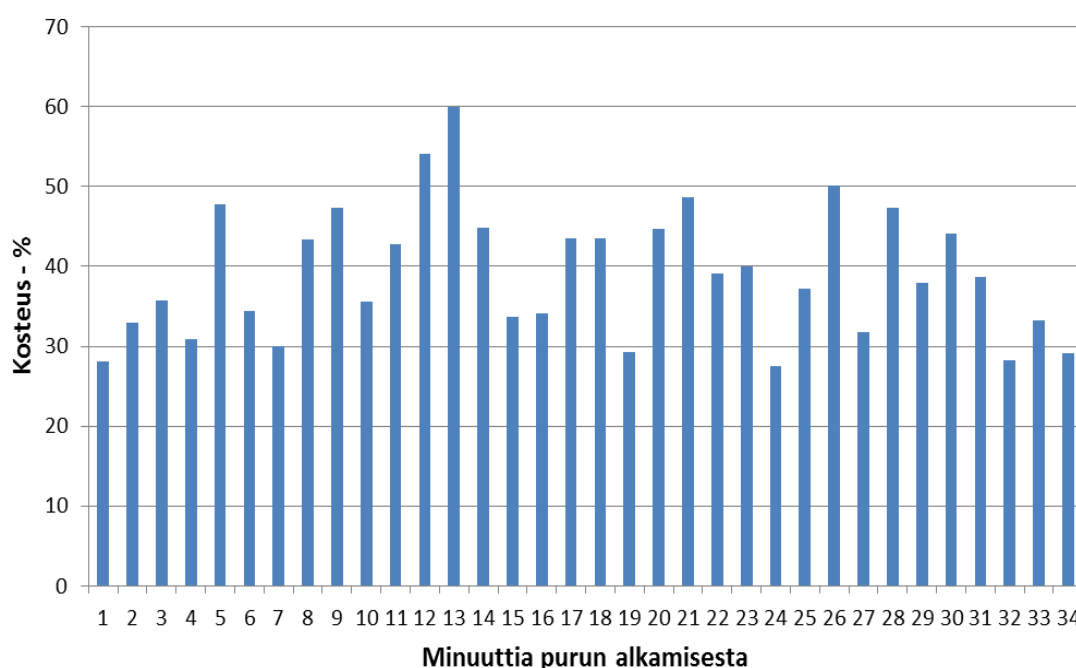
Polttoaineiden laatua tarkasteltiin näytteenotolla. Näytteenotto suoritettiin neljällä eri tavalla vertailun vuoksi. Käsinäytteiden osalta voitiin tulosten perusteella havaita määrittystavan olevan epätarkka. Lajittuminen näytteenottoon, kosteuden vaihtelu kuorman sisäisesti sekä näytteiden lajittuminen analysointivaiheessa vaikuttivat käsinäytteiden tarkasteluun kappaleessa 3 esitettyjen tapojen mukaisesti.

Yksittäisnäytteitä otettiin mittausten aikana 6 kappaletta kuormaa kohden. Tällöin kappaleessa 3.2 esitettyjen näytteiden lukumäärän mukaisesti päästiin yhden kuorman osalta jopa 95 % tarkkuuteen. Toimituserän kuormien lisääntyessä myös tarkkuus kasvoi, joka mittausten aikana yksittäisnäytteiden osalta oli kuvan 3.4. mukaisesti noin 98 %:iin toimituserässä.

Kuljettajan käsinäytteenotto perustuu Kaipolan voimalaitoksella koneellisen näytteenottimen mukaiseen näytteeseen. Kuljettaja purkaa kuorman murskalle vievälle kul-

jettimelle, jonka jälkeen hän kasaa auton lähtövalmiiksi ja ajaa näytteenottopaikan viereen. Näytteenotto tapahtuu yhdestä kohtaa kuormaa, jonka kuljettaja ottaa normaalisti kuorman purun jälkeen kuorman loppu puolelta. Yhden näytteen ottaminen toimituserästä, jossa päiväkohtaisten kuormien lukumäärä on 5, tarkoittaa noin 95 % tarkkuutta laatutarkastelussa kappaleen 3.2 mukaisesti. Kuvassa 9.6. on esitettyä eräs mitausten aikana röntgenillä mitattu kantokuorma, jossa kosteus on annettu minuuttikeskiarvona. Tarkastelemalla kuvaa voidaan havaita kosteusvaihtelun olevan melko suurta kuorman sisällä. Voidaankin todeta, että toimituserästä toimitettavien kuormien vähentäessä myös tarkkuus pienenee, jolloin yhden näytteen mukaisella määrittelyksellä laadun määrittäminen on hyvin epätarkkaa.

Kuorman sisäinen kosteusvaihtelu



Kuva 9.6. Kuorman sisäinen kosteusvaihtelu kantokuormassa.

Röntgenmittauksilla mitattiin polttoaineen laatu koko kuormasta. Röntgenmittausten tarkkuutta pyrittiin tarkastamaan kirjaamalla yksittäisnäytteiden tarkat kellonajat ylös ja vertaamalla sitä röntgenillä saatuun minuuttikeskiarvoon tuona ajanhetkenä. Röntgenin parametrit ovat määritetty näytteenoton sekä kokemuksen perusteella, joten tarkkuus vaihtelee. Tämän lisäksi polttoainepatjan paksuus vaihteli merkittävästi mittausten aikana, joka myös osittain vaikutti tuloksiin. Röntgenin mittaustuloksista on kuitenkin pyritty sulkemaan ääripäät pois, jotka vaikuttavat merkittävästi tuloksiin, kuten tyhjä sekä yli täysi kuljetin. Röntgenmittauksessa määritetty vierasaineen määrä on myös kokemuspäiräinen mittausta, joka perustuu ohjelman kykyyn erotella tietyllä tiheydellä esiintyvät esineet. Mittausten aikana havaittiin, että röntgen mittaa jään ja lumen helposti vierasaineksi niiden tiheyden ollessa hyvin lähellä hiekan ja kiven tiheyttä. Tämä saattoi vaikuttaa jonkin verran mittaustuloksiin.

Turpeen kosteus mitattiin ainoastaan käsinäytteiden perusteella. Turvelinja sijaitsi Kaipolan voimalaitoksella eri paikassa kuin metsäpolttoaineiden purkulinja, joten röntgenmittauksia ei päästy toteuttamaan niiden osalta. Turpeen mittauksessa otettiin metsäpolttoaineiden tapaan kuusi näytettä, joten toimituserässä päästiin päivän osalta noin 95 %:n todennäköisyyteen kosteudessa.

Kattiladatan keräyspisteiden määrittäminen oli myös melko epätarkkaa. Polttoaineen syöttäminen kuljettimille sekä kattilaan vaikuttavat merkittävästi tarkastelu pisteisiin. Kattiladata on kerätty talteen tunnin tarkkuudella. Kattilassa virtausten mittaaminen tapahtuu erityyppisillä mittamenetelmillä. Kattilassa tapahtuvia kokonaismittausvirheitä on vaikea arvioida, sillä eri mittalaitteiden tarkkuuksia ei tunneta sekä säteily- ja johtumishäviöiden mittaaminen on hyvin monimutkaista. Työssä arvioitiin säteily- ja johtumishäviöiden olevan noin 2 % polttoainetehosta.

10 YHTEENVETO

Suomessa biopolttoaineiden käyttö energian tuotannossa kattaa jo neljäsosan primäärienergian tarpeesta. Metsäteollisuuden energiatuotanto perustuu kokoajan enemmän ja enemmän tuotannosta syntyvien sivutuotteiden käyttöön sekä metsäpolttoaineiden keräämiseen hakkuilta. Yleisesti käytössä oleva leijukattilateknologia onkin tehnyt energiantuotannosta Suomessa taloudellisen vaihtoehdon sen laajan polttoaine mahdollisuuksien sekä puhtaan palamisen vuoksi. Tuotannon yleistyminen on kuitenkin tuonut mukanaan myös laatuun vaikuttavia tekijöitä polttoainetoimitusten kasvaessa.

Polttoainelaatuun vaikuttavien tekijöiden – kosteuden, epäpuhtauksien sekä lämpöarvon määritysmenetelmät ovat nykyisten mittausmenetelmien mukaan hyvin epätarkkoja. Vuoden 2014 aikana käyttöön otettavan energiapuunmittastandardin mukaan polttoaineiden mittauksessa syntyvät mittavirheet kasvavat merkittävästi näytteenoton perustuessa pieneen otantaan. Nykyisten mittausmenetelmien avulla määritetystä polttoaineen laadusta on lähes mahdotonta sanoa, mitä polttoaine-erä todellisuudessa sisälsi. Kuorman sisällä kosteuden vaihtelu on myös merkittävä tekijä, otettaessa yksittäisnäytteitä koko kuormaa edustavaan energiasisällön määrittämiseen. Voidaankin todeta, että tämän hetkiselä laadun määritysmenetelmällä näytteen edustavuus kuormasta on hyvin pieni.

Leijukattilan toimintaa tarkastelemalla voidaan mittavirheet polttoaineen laadunmäärittäksessä todeta. Energiataseen mukaan häviöitä syntyy merkittäviä määriä, joiden pois sulkeminen on mahdollista teknologian kehittymisen sekä investointien myötä. Muuttuvien kustannusten nousu ajaakin metsäteollisuuden pohtimaan laadun tarkempaa määrittästä sekä löytämään energiansästäkohteita myös voimalaitokselta.

Toimitusketjun hallinta vaikuttaa myös merkittävästi polttoaineiden laatuun sekä hintaan. Öljyn hinnan nousu näkyy myös logistiikkakustannuksissa, joten keinojen pohdiminen hankinnan optimoimiseen on tarpeen. Metsäenergian nosto, varastointi, toimitus voimalaitokselle sekä varastonhallinta voimalaitoksella ovat keinoja joita kehittämällä päästään merkittäviin säästöihin.

Tulevaisuudessa voimalaitoksen ja metsäenergian hankinnan yhteistyöintegraatio tulee entistä suurempaan rooliin. Voimalaitoksen tarpeet tulee ottaa huomioon hankinnassa ja hankinnan tulee huomioida laatutekijät toimituksissa. Toimittajien ohjaus oikeaan suuntaan on merkittävä tekijä tulevaisuudessa kun pohditaan laadun parannuskeinoja. Vuodenaikojen merkitys, varastokasan ikä sekä voimalaitoksen tarve tulee selvittää myös toimittajalle.

Voimalaitoksella jatkuvatoimisella polttoaineen laadunmittauksella voidaan vaikuttaa kattilan säätöön merkittävästi. Jatkuvatoimisella mittarilla voidaan tietää jatkuvasti

mitä polttoainetta kuljettimella kulkee. Polttoaineen laadun mukaan voidaan varastointi laadunmukaisiin kasoihin hoitaa voimalaitoksella, joka helpottaa merkittävästi kattilan säätöä. Lisäksi jatkuvatoimisella polttoaineen laadunmittauksella voidaan tietää mitä minäkin hetkenä kattilaan syötetään. Tarkka tieto polttoaineen laadusta auttaa polttoilman säätämistä kattilassa. Polton ilmakertoimen pienentäminen tuo säätöä myös laitteistoihin, sillä puhaltimien kuormitus pienenee pienemmän yli-ilman ansiosta. Kulumista tapahtuu vähemmän myös käsittelylaitteistoissa, kun pystyttäisiin erottelemaan merkittäviä määriä maata ja kiveä sisältävät kuormat erilliseen kasaan.

Tulevaisuudessa tuleekin pohtia investointeja jatkuvatoimisiin mittareihin niiden tarkemman laadunmäärityksen sekä sen tarjoamien muiden mahdollisuuksien ansiosta. Tarkemmat analyysit sekä tiedot polttoaineen laadusta tuovat merkittäviä säästöjä biopolttoaineita käyttäviin voimalaitoksiin. Voidaan kuitenkin varmuudella sanoa, että jatkuvatoimiseen polttoaineen mittaukseen siirtyminen vaatii vielä kehitystyötä ja tarkempia määrityksiä ennen kuin voidaan ottaa se käyttöön ainoana laadunmääritys keinona.

LÄHTEET

Alakangas, E. 2000. VTT Tiedotteita. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. 196 s.

Alakangas, E., Kanervirta, M.-L., Kallio, M. 1987. Kotimaisten polttoaineiden ominaisuudet. Käsikirja. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 762. 125 s.

Alakangas, E. Sauranen, T., Vesisenaho, T. 1999. Hakkuutähteestä polttihakkeeksi. Koulutusmateriaali. Jyväskylä, VTT Energia. 82 s.

Alakangas, E., Impola, R. 2013. Puupolttoaineiden laatuohje (VTT-M-07608-13). 62 s.

Bioenergiaporssi. 2013. Uusiutuvanenergian markkinapaikka. [WWW]. [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: <http://www.bioenergiaporssi.fi>.

Finbio Ry. 2013. Bioenergiatietoa. [WWW]. [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: <http://www.finbioenergy.fi/default.asp?sivuID=9164>.

Finlex. 2013. Laki puutavaran mittauksesta. [WWW]. [Viitattu 8.6.2014]. Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130414>.

Hakkila, P. (toim.) 1992. Metsäenergia. Helsinki. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. 51 s.

Hakkila, P., Kalaja, H., Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä. Helsinki, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582.

Halonen, M. 2013. Kantojen laatu kesällä 2013 sekä hakkuutähdevarastot. Keski-Suomen integraatti-alue, Kaipolan voimalaitos, UPM-Kymmene Oyj.

Halonen, P., Helynen, S., Flyktman, M., Kallio, E., Kallio, M., Paappanen, T., Vesterinen, P. 2003. Bioenergiantuotanto- ja käyttöketjut sekä niiden suorat työllisyysvaikutukset. VTT Prosessit. 51 s.

Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi – yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. Jyväskylä: VTT Raportti. 17 s.

Hillebrand, K., Nurmi, J. 2001. Hakkuutähteiden laadunhallinta. VTT Energian raportteja 2/2001. 51 s. + liitt. 11 s.

Hillebrand, K., Nurmi, J. 2004. Nuorista metsistä korjatun energiapuun kuivatus ja varastointi. Projektiraportti PRO2/P6014/04, VTT Prosessit, 27 s. + liitt. 3 s.

- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 1997. Höyrykattilatekniikka. Toinen painos. Helsinki, Oy Edita Ab ja Opetushallitus. 316 s.
- Impola, R. 1995. Yhteenveto vuonna 1994 tehdyistä metsähakkeen käyttökokeista Keski-Suomessa. Keski-Suomen Metsäenergia-projeksi, Raportti 16.1. Jyväskylä: VTT Energia. 7 s. + liitt. 58 s.
- Inray Oy. 2013. Biopolttoaineiden laadunmittausjärjestelmät. [WWW]. [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: <http://www.inray.fi/index22.html>
- Knuuttila, K. 2003. Puuenergia. Jyväskylän Teknoliakeskus Oy. 115 s.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M., Asikainen, A. 2010. VTT Tiedotteita. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. 143 s.
- Metla. 2013. Infokortti 7. [WWW]. [Viitattu 24.11.2013]. Saatavissa: http://www.forestenergy.org/observer:get_page/observer/action/details/itemid/220&viewportheight=796&viewportwidth=1440
- Nurmi, J. 1993. Pienkokoisten puiden maanpäällisen biomassan lämpöarvo. Helsinki. Acta Forestalia Fennica 236. 30 s.
- Nurmi, J. 1997. Heating values of mature trees. Tampere, Acta Forestalia Fennica 265. 28 s.
- Pitkänen, A. 2013. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto/Kemian ja biotekniikan laitos/Voimalaitos- ja polttotekniikka. KEB-45100 Polttotekniikka harjoitukset. 87 s.
- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen, toinen täydennetty painos. Jyväskylä, Gummerus Kirjapaino Oy. International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.
- Raiko, R., Kirvelä, K. 2008. Energiatekniikan perusteet, luentomoniste 2008, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 174 s.
- Raiko, R., Saarenpää, I. 2009. Höyrytekniikka, luentomoniste 2009, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 284 s.
- Raiko, R. 2013. Voimalaitostekniikka, luentomoniste 2013, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 248 s. + liitt. 24 s.
- Saarenrinne, P. 2010. Energiatekniikan mittaukset, luentomoniste 2010, Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 214 s.
- UPM intranet. 2014. Jokilaakson tehtaiden esittely 2013.
- Wilén, C., Moilanen, A., Kurkela, E. 1996. Biomass feedstock analyses. Espoo, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 282. 25 s. + liitt. 8 s.

LIITE 1: PUUPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA

| Ominaisuus | Metsätähde- hake | Kokopuu- hake | Rankahake | Kantohake | Havupuun kuori | Koivun kuori | Pilke |
|--|---------------------|------------------|-----------|--------------------|-------------------|--------------|----------------------------------|
| Kosteus, % (hakkeet kaatotuoreena) | 50–60 | 45–55 | 40–55 | 30–50 | 50–65 | 45–55 | 20–25 |
| Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg | 18,5–20 | 18,5–20 | 18,5–20 | 18,5–20 | 18,5–20 | 21–23 | 18,5–19,0 |
| Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg | 6–9 | 7–10 | 7–11 | 8–13 | 5–9 | 8–11 | 13,4–14,5 |
| Irtotiheys saapumis- tilassa, kg/i-m ³ | 250–400 | 250–350 | 250–350 | 200–300 | 250–350 | 300–400 | 240–320 |
| Energia tiheys, MWh/i-m ³ | 0,7–0,9 | 0,7–0,9 | 0,7–0,9 | 0,7–1,0 | 0,5–0,7 | 0,6–0,9 | 1,35–1,6 MWh/p-m ³ |
| Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, % | 1–3 | 1–2 | 0,5–2 | 1–3 | 1–3 | 1–3 | 1,2 |
| Hiilipitoisuus kuiva-aineessa C, % | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 |
| Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), % | 6–6,2 | 5,4–6 | 5,4–6 | 5,4–6 | 5,7–5,9 | 6,2–6,8 | 6,0–6,5 |
| Rikki pitoisuus kuiva-aineessa (S), % | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Typpipitoisuus kuiva-aineessa (N), % | 0,3–0,5 | 0,3–0,5 | 0,3–0,5 | 0,3–0,5 | 0,3–0,5 | 0,5–0,8 | 0,3–0,5 |
| Ominaisuus | Puutähde- hake | Sahahake | Sahanpuru | Kutterin- lastu | Hiontapöly | Puupelletti | Vaneri- tähde |
| Kosteus, p-% | 10–50 | 45–60 | 45–60 | 5–15 | 5–15 | 8–10 | 5–15 |
| Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg | 18,5–20 | 18,5–20 | 19–19,2 | 19–19,2 | 19–19,2 | 19,0–19,2 | 19–19,2 |
| Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg | 6–15 | 6–10 | 6–10 | 16–18 | 16–18 | 16,8 | 16–18 |
| Irtotiheys saapumis- tilassa, kg/i-m ³ | 150–300 | 250–350 | 250–350 | 80–120 | 100–150 | 500–650 | 200–300 |
| Energia tiheys, MWh/i-m ³ | 0,7–0,9 | 0,5–0,8 | 0,45–0,7 | 0,45–0,55 | 0,5–0,65 | 2,9–3,4 | 0,9–1,1 |
| Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, % | 0,4–1 | 0,5–2 | 0,4–0,5 | 0,4–0,5 | 0,4–0,8 | 0,4–0,5 | 0,4–0,8 |
| Hiilipitoisuus kuiva-aineessa C, % | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 48–52 |
| Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), % | 5,4–6,4 | 5,4–6,4 | 6,2–6,4 | 6,2–6,4 | 6,2–6,4 | 6,2–6,4 | 6,2–6,4 |
| Rikki pitoisuus kuiva-aineessa (S), % | < 0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Typpipitoisuus kuiva-aineessa (N), % | 0,1–0,5 | 0,1–0,5 | 0,1–0,5 | 0,1–0,5 | 0,1–0,5 | 0,1–0,5 | 0,1–0,5 |

(Raiko et al. 2002, s. 136.)

LIITE 2: KORRELAATIOKERTOIMET KYLLÄISEN HÖYRYN OSAPAINEN POLYNOMISOVITTEE- SEEN

| Yhdiste | Kertoimet | | | | | Lämpötila-alue | | % |
|----------------------------------|-----------|---------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|------|---|
| | A | B | C | $D \times 10^3$ | $E \times 10^6$ | [K] | | |
| Ar | 24,018 | -542,78 | -8,4430 | 16,824 | — | 83,8 ... 150,9 | 0,18 | |
| He | 2,3826 | -2,8323 | 4,1992 | -506,18 | 38084,1 | 0,9 ... 5,2 | 0,89 | |
| Ne | 1,4691 | -70,075 | 3,0607 | -14,361 | — | 25,0 ... 44,5 | 1,25 | |
| H ₂ | 5,2366 | -46,280 | -0,44809 | 25,290 | — | 13,8 ... 33,0 | 0,17 | |
| N ₂ | 21,623 | -455,57 | -7,5107 | 17,214 | — | 63,2 ... 126,4 | 0,16 | |
| O ₂ | 5,6486 | -411,30 | 1,8118 | -25,042 | 62,612 | 54,1 ... 154,8 | 0,36 | |
| CO | 32,863 | -606,91 | -12,969 | 27,551 | — | 72,5 ... 133,2 | 0,37 | |
| CO ₂ | 47,544 | -1792,2 | -16,559 | 13,833 | — | 217,2 ... 304,4 | 0,12 | |
| H ₂ O | 16,373 | -2818,6 | -1,6908 | -5,7546 | 4,0073 | 273,2 ... 647,4 | 0,09 | |
| H ₂ O ₂ | 44,791 | -4022,7 | -13,076 | 4,5627 | — | 273,1 ... 728,2 | 2,44 | |
| SO ₂ | 46,554 | -2456,3 | -15,169 | 9,0026 | — | 205,6 ... 430,8 | 0,70 | |
| SO ₃ | 160,89 | -8081,2 | -54,240 | 4,3154 | 17,432 | 272,2 ... 491,5 | 0,55 | |
| N ₂ O | 54,061 | -1894,7 | -19,406 | 16,572 | — | 184,7 ... 309,7 | 0,62 | |
| NO | 258,32 | -4361,0 | -115,06 | 167,15 | — | 116,4 ... 270,3 | 0,69 | |
| NO ₂ | 33,024 | -2276,7 | -10,143 | 8,9510 | — | 261,9 ... 431,6 | 0,26 | |
| NH ₃ | 38,440 | -2066,2 | -12,105 | 7,7768 | — | 208,2 ... 405,6 | 0,20 | |
| N ₂ H ₄ | 60,878 | -3880,3 | -20,575 | 15,585 | -5,0525 | 288,2 ... 653,2 | 1,50 | |
| HF | 66,244 | -2588,0 | -25,140 | 28,493 | -9,9602 | 198,5 ... 461,2 | 0,44 | |
| HCl | 136,05 | -3047,3 | -58,416 | 95,496 | -58,507 | 122,4 ... 324,7 | 0,47 | |
| HBr | -351,11 | 5375,2 | 161,89 | -259,04 | 157,16 | 190,2 ... 363,2 | 0,97 | |
| HI | 33,943 | -1777,9 | -10,620 | 6,9457 | — | 213,7 ... 424,2 | 0,52 | |
| CH ₄ | 22,573 | -656,24 | -7,3942 | 11,896 | — | 91,0 ... 191,3 | 0,45 | |
| C ₂ H ₆ | 16,316 | -1074,8 | -3,1434 | 4,5534 | 10,373 | 93,7 ... 305,5 | 0,42 | |
| C ₃ H ₈ | 36,007 | -1737,2 | -11,666 | 8,5187 | — | 144,3 ... 370,0 | 0,46 | |
| C ₂ H ₄ | 30,895 | -1196,8 | -10,153 | 9,9351 | — | 104,2 ... 283,3 | 0,80 | |
| C ₃ H ₆ | 36,877 | -1725,5 | -12,057 | 8,9948 | — | 123,2 ... 365,3 | 0,58 | |
| C ₄ H ₈ | 41,610 | -2158,8 | -13,580 | 8,6536 | — | 143,2 ... 419,5 | 0,68 | |
| C ₆ H ₆ | 51,204 | -3245,7 | -16,403 | 7,540 | — | 280,8 ... 562,6 | 0,65 | |
| C ₁₀ H ₈ | 192,16 | -8336,3 | -72,834 | 56,768 | -17,319 | 356,1 ... 748,2 | 0,94 | |
| CH ₃ OH | -42,629 | -1186,2 | 23,279 | -35,082 | 17,578 | 205,8 ... 513,2 | 0,99 | |
| C ₂ H ₅ OH | -10,967 | -2212,6 | 10,298 | -21,061 | 10,748 | 228,2 ... 516,2 | 0,96 | |
| C ₃ H ₇ OH | -338,31 | 5127,5 | 148,80 | -175,79 | 74,666 | 273,2 ... 536,9 | 1,18 | |
| C ₄ H ₉ OH | -458,03 | 7760,4 | 199,14 | -229,44 | 95,289 | 272,0 ... 563,0 | 1,19 | |

(Raiko et al. 2002, s. 35.)

LIITE 3: AINEIDEN MUODOSTUMISENTALPIOITA

| ΔH_f (MJ/kmol) | | ΔH_f (MJ/kmol) | |
|------------------------------------|----------|-----------------------------|-----------|
| CO ₂ | -393,505 | SO ₂ | -296,813 |
| CO | -110,541 | SO ₃ | -395,765 |
| H ₂ O (g) | -241,826 | NO | 90,291 |
| H ₂ O (l) | -285,830 | NO ₂ | 33,095 |
| CH ₄ (g) | -74,873 | N ₂ O | 82,048 |
| C ₂ H ₆ (g) | -84,684 | NH ₃ | -45,940 |
| C ₃ H ₈ (g) | -103,847 | HCN | 135,143 |
| C ₄ H ₁₀ (g) | -126,148 | CaO | -635,089 |
| H ₂ S | -20,502 | CaCO ₃ (calcite) | -1206,921 |
| COS | -138,407 | Ca(OH) ₂ | -986,085 |

*Taulukko 2.3 Eräiden aineiden muodostumisentaltioita (referenssitila: $p=100$ kPa;
 $T=298,15$ K)*

(Raiko et al. 2002, s. 50.)

LIITE 4: YLEISTEN KAASUJEN TAULUKKOENTALPIAT

| Aine M | kuiva ilma (g) 28,9647 kg/kmol | | O ₂ (g) 31,999 kg/kmol | | N ₂ (g) 28,013 kg/kmol | | N _{2r} (g) 28,1606 kg/kmol | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T [K] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] |
| 200,00 | 29,034 | 1,002 | 29,120 | 0,910 | 29,110 | 1,039 | 29,010 | 1,030 |
| 250,00 | 29,054 | 1,003 | 29,209 | 0,913 | 29,111 | 1,039 | 29,014 | 1,030 |
| 298,15 | 29,102 | 1,005 | 29,376 | 0,918 | 29,123 | 1,040 | 29,029 | 1,031 |
| 300,00 | 29,105 | 1,005 | 29,385 | 0,918 | 29,125 | 1,040 | 29,030 | 1,031 |
| 350,00 | 29,202 | 1,008 | 29,701 | 0,928 | 29,165 | 1,041 | 29,071 | 1,032 |
| 400,00 | 29,354 | 1,013 | 30,106 | 0,941 | 29,246 | 1,044 | 29,154 | 1,035 |
| 450,00 | 29,562 | 1,021 | 30,581 | 0,956 | 29,389 | 1,049 | 29,290 | 1,040 |
| 500,00 | 29,820 | 1,030 | 31,091 | 0,972 | 29,583 | 1,056 | 29,482 | 1,047 |
| 550,00 | 30,118 | 1,040 | 31,596 | 0,987 | 29,829 | 1,065 | 29,724 | 1,056 |
| 600,00 | 30,443 | 1,051 | 32,089 | 1,003 | 30,113 | 1,075 | 30,006 | 1,066 |
| 650,00 | 30,785 | 1,063 | 32,550 | 1,017 | 30,423 | 1,086 | 30,316 | 1,077 |
| 700,00 | 31,134 | 1,075 | 32,981 | 1,031 | 30,752 | 1,098 | 30,644 | 1,088 |
| 750,00 | 31,482 | 1,087 | 33,374 | 1,043 | 31,089 | 1,110 | 30,979 | 1,100 |
| 800,00 | 31,822 | 1,099 | 33,734 | 1,054 | 31,430 | 1,122 | 31,314 | 1,112 |
| 850,00 | 32,152 | 1,110 | 34,059 | 1,064 | 31,767 | 1,134 | 31,644 | 1,124 |
| 900,00 | 32,467 | 1,121 | 34,354 | 1,074 | 32,094 | 1,146 | 31,964 | 1,135 |
| 950,00 | 32,767 | 1,131 | 34,624 | 1,082 | 32,402 | 1,157 | 32,272 | 1,146 |
| 1000,00 | 33,050 | 1,141 | 34,870 | 1,090 | 32,696 | 1,167 | 32,565 | 1,156 |
| 1050,00 | 33,316 | 1,150 | 35,095 | 1,097 | 32,975 | 1,177 | 32,842 | 1,166 |
| 1100,00 | 33,566 | 1,159 | 35,302 | 1,103 | 33,240 | 1,187 | 33,103 | 1,176 |
| 1150,00 | 33,801 | 1,167 | 35,492 | 1,109 | 33,489 | 1,195 | 33,349 | 1,184 |
| 1200,00 | 34,020 | 1,175 | 35,667 | 1,115 | 33,723 | 1,204 | 33,580 | 1,192 |
| 1250,00 | 34,226 | 1,182 | 35,832 | 1,120 | 33,943 | 1,212 | 33,795 | 1,200 |
| 1300,00 | 34,419 | 1,188 | 35,987 | 1,125 | 34,148 | 1,219 | 33,998 | 1,207 |
| 1350,00 | 34,600 | 1,195 | 36,135 | 1,129 | 34,340 | 1,226 | 34,187 | 1,214 |
| 1400,00 | 34,770 | 1,200 | 36,276 | 1,134 | 34,519 | 1,232 | 34,364 | 1,220 |
| 1450,00 | 34,930 | 1,206 | 36,412 | 1,138 | 34,687 | 1,238 | 34,530 | 1,226 |
| 1500,00 | 35,081 | 1,211 | 36,543 | 1,142 | 34,844 | 1,244 | 34,685 | 1,232 |
| 1550,00 | 35,223 | 1,216 | 36,671 | 1,146 | 34,991 | 1,249 | 34,831 | 1,237 |
| 1600,00 | 35,358 | 1,221 | 36,797 | 1,150 | 35,128 | 1,254 | 34,967 | 1,242 |
| 1650,00 | 35,485 | 1,225 | 36,920 | 1,154 | 35,257 | 1,259 | 35,095 | 1,246 |
| 1700,00 | 35,606 | 1,229 | 37,041 | 1,158 | 35,378 | 1,263 | 35,216 | 1,251 |
| 1750,00 | 35,721 | 1,233 | 37,160 | 1,161 | 35,491 | 1,267 | 35,328 | 1,255 |
| 1800,00 | 35,830 | 1,237 | 37,278 | 1,165 | 35,598 | 1,271 | 35,435 | 1,258 |
| 1850,00 | 35,934 | 1,241 | 37,395 | 1,169 | 35,699 | 1,274 | 35,534 | 1,262 |
| 1900,00 | 36,033 | 1,244 | 37,511 | 1,172 | 35,794 | 1,278 | 35,628 | 1,265 |
| 1950,00 | 36,128 | 1,247 | 37,626 | 1,176 | 35,884 | 1,281 | 35,717 | 1,268 |
| 2000,00 | 36,219 | 1,250 | 37,741 | 1,179 | 35,969 | 1,284 | 35,800 | 1,271 |
| 2050,00 | 36,306 | 1,253 | 37,855 | 1,183 | 36,050 | 1,287 | 35,879 | 1,274 |
| 2100,00 | 36,390 | 1,256 | 37,969 | 1,187 | 36,126 | 1,290 | 35,954 | 1,277 |
| 2150,00 | 36,470 | 1,259 | 38,082 | 1,190 | 36,198 | 1,292 | 36,026 | 1,279 |
| 2200,00 | 36,549 | 1,262 | 38,194 | 1,194 | 36,267 | 1,295 | 36,093 | 1,282 |
| 2250,00 | 36,624 | 1,264 | 38,306 | 1,197 | 36,333 | 1,297 | 36,158 | 1,284 |
| 2300,00 | 36,697 | 1,267 | 38,418 | 1,201 | 36,395 | 1,299 | 36,220 | 1,286 |
| 2350,00 | 36,768 | 1,269 | 38,528 | 1,204 | 36,454 | 1,301 | 36,279 | 1,288 |
| 2400,00 | 36,836 | 1,272 | 38,638 | 1,207 | 36,511 | 1,303 | 36,335 | 1,290 |
| 2450,00 | 36,902 | 1,274 | 38,747 | 1,211 | 36,565 | 1,305 | 36,388 | 1,292 |
| 2500,00 | 36,964 | 1,276 | 38,855 | 1,214 | 36,616 | 1,307 | 36,438 | 1,294 |

(Raiko et al. 2002, s. 694.)

| Aine M | CO ₂ (g) 44,010 kg/kmol | | CO (g) 28,010 kg/kmol | | H ₂ O(g) 18,015 kg/kmol | | H ₂ (g) 2,016 kg/kmol | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T [K] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] |
| 200,00 | 32,360 | 0,735 | 29,110 | 1,039 | 33,340 | 1,851 | 27,450 | 13,616 |
| 250,00 | 34,729 | 0,789 | 29,115 | 1,039 | 33,428 | 1,856 | 28,085 | 13,931 |
| 298,15 | 37,132 | 0,844 | 29,140 | 1,040 | 33,590 | 1,865 | 28,836 | 14,304 |
| 300,00 | 37,217 | 0,846 | 29,144 | 1,040 | 33,596 | 1,865 | 28,849 | 14,310 |
| 350,00 | 39,369 | 0,895 | 29,217 | 1,043 | 33,884 | 1,881 | 29,098 | 14,434 |
| 400,00 | 41,326 | 0,939 | 29,342 | 1,048 | 34,261 | 1,902 | 29,182 | 14,475 |
| 450,00 | 43,064 | 0,978 | 29,540 | 1,055 | 34,719 | 1,927 | 29,238 | 14,503 |
| 500,00 | 44,625 | 1,014 | 29,794 | 1,064 | 35,230 | 1,956 | 29,260 | 14,514 |
| 550,00 | 46,040 | 1,046 | 30,102 | 1,075 | 35,763 | 1,985 | 29,291 | 14,529 |
| 600,00 | 47,323 | 1,075 | 30,444 | 1,087 | 36,322 | 2,016 | 29,326 | 14,547 |
| 650,00 | 48,495 | 1,102 | 30,803 | 1,100 | 36,899 | 2,048 | 29,377 | 14,572 |
| 700,00 | 49,563 | 1,126 | 31,171 | 1,113 | 37,494 | 2,081 | 29,442 | 14,604 |
| 750,00 | 50,541 | 1,148 | 31,537 | 1,126 | 38,103 | 2,115 | 29,525 | 14,645 |
| 800,00 | 51,434 | 1,169 | 31,898 | 1,139 | 38,723 | 2,149 | 29,625 | 14,695 |
| 850,00 | 52,252 | 1,187 | 32,246 | 1,151 | 39,352 | 2,184 | 29,744 | 14,754 |
| 900,00 | 52,999 | 1,204 | 32,578 | 1,163 | 39,988 | 2,220 | 29,880 | 14,821 |
| 950,00 | 53,682 | 1,220 | 32,890 | 1,174 | 40,627 | 2,255 | 30,035 | 14,898 |
| 1000,00 | 54,308 | 1,234 | 33,183 | 1,185 | 41,267 | 2,291 | 30,205 | 14,983 |
| 1050,00 | 54,884 | 1,247 | 33,455 | 1,194 | 41,904 | 2,326 | 30,386 | 15,073 |
| 1100,00 | 55,412 | 1,259 | 33,710 | 1,203 | 42,535 | 2,361 | 30,579 | 15,168 |
| 1150,00 | 55,897 | 1,270 | 33,949 | 1,212 | 43,158 | 2,396 | 30,782 | 15,269 |
| 1200,00 | 56,342 | 1,280 | 34,172 | 1,220 | 43,769 | 2,430 | 30,992 | 15,373 |
| 1250,00 | 56,752 | 1,290 | 34,380 | 1,227 | 44,364 | 2,463 | 31,206 | 15,479 |
| 1300,00 | 57,130 | 1,298 | 34,573 | 1,234 | 44,943 | 2,495 | 31,424 | 15,587 |
| 1350,00 | 57,480 | 1,306 | 34,752 | 1,241 | 45,508 | 2,526 | 31,643 | 15,696 |
| 1400,00 | 57,803 | 1,313 | 34,919 | 1,247 | 46,055 | 2,556 | 31,863 | 15,805 |
| 1450,00 | 58,103 | 1,320 | 35,075 | 1,252 | 46,583 | 2,586 | 32,081 | 15,913 |
| 1500,00 | 58,381 | 1,327 | 35,220 | 1,257 | 47,091 | 2,614 | 32,298 | 16,021 |
| 1550,00 | 58,641 | 1,332 | 35,355 | 1,262 | 47,580 | 2,641 | 32,513 | 16,127 |
| 1600,00 | 58,883 | 1,338 | 35,481 | 1,267 | 48,050 | 2,667 | 32,725 | 16,233 |
| 1650,00 | 59,109 | 1,343 | 35,599 | 1,271 | 48,501 | 2,692 | 32,933 | 16,336 |
| 1700,00 | 59,321 | 1,348 | 35,710 | 1,275 | 48,934 | 2,716 | 33,138 | 16,438 |
| 1750,00 | 59,519 | 1,352 | 35,814 | 1,279 | 49,349 | 2,739 | 33,339 | 16,537 |
| 1800,00 | 59,705 | 1,357 | 35,912 | 1,282 | 49,747 | 2,761 | 33,536 | 16,635 |
| 1850,00 | 59,881 | 1,361 | 36,004 | 1,285 | 50,129 | 2,783 | 33,728 | 16,730 |
| 1900,00 | 60,046 | 1,364 | 36,090 | 1,288 | 50,496 | 2,803 | 33,916 | 16,823 |
| 1950,00 | 60,202 | 1,368 | 36,172 | 1,291 | 50,848 | 2,823 | 34,100 | 16,914 |
| 2000,00 | 60,349 | 1,371 | 36,249 | 1,294 | 51,185 | 2,841 | 34,279 | 17,003 |
| 2050,00 | 60,488 | 1,374 | 36,322 | 1,297 | 51,509 | 2,859 | 34,454 | 17,090 |
| 2100,00 | 60,620 | 1,377 | 36,391 | 1,299 | 51,821 | 2,877 | 34,625 | 17,175 |
| 2150,00 | 60,745 | 1,380 | 36,457 | 1,302 | 52,120 | 2,893 | 34,791 | 17,258 |
| 2200,00 | 60,864 | 1,383 | 36,519 | 1,304 | 52,407 | 2,909 | 34,953 | 17,338 |
| 2250,00 | 60,978 | 1,386 | 36,578 | 1,306 | 52,682 | 2,924 | 35,111 | 17,416 |
| 2300,00 | 61,086 | 1,388 | 36,634 | 1,308 | 52,947 | 2,939 | 35,264 | 17,492 |
| 2350,00 | 61,189 | 1,390 | 36,688 | 1,310 | 53,201 | 2,953 | 35,414 | 17,566 |
| 2400,00 | 61,288 | 1,393 | 36,740 | 1,312 | 53,445 | 2,967 | 35,560 | 17,639 |
| 2450,00 | 61,382 | 1,395 | 36,789 | 1,313 | 53,679 | 2,980 | 35,703 | 17,710 |
| 2500,00 | 61,473 | 1,397 | 36,836 | 1,315 | 53,904 | 2,992 | 35,842 | 17,779 |

(Raiko et al. 2002, s. 695.)

| Aine M | SO ₂ (g) 64,065 kg/kmol | | COS (g) 60,076 kg/kmol | | H ₂ S (g) 34,082 kg/kmol | | CH ₄ (g) 16,043 kg/kmol | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T [K] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] | C _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$] | c _p [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$] |
| 200,00 | 36,383 | 0,568 | 41,506 | 0,691 | 34,187 | 1,003 | 33,480 | 2,087 |
| 250,00 | 38,136 | 0,595 | 41,592 | 0,692 | 34,213 | 1,004 | 34,308 | 2,139 |
| 298,15 | 39,900 | 0,623 | 43,840 | 0,730 | 34,867 | 1,023 | 35,645 | 2,222 |
| 300,00 | 39,938 | 0,623 | 45,791 | 0,762 | 35,585 | 1,044 | 35,707 | 2,226 |
| 350,00 | 41,666 | 0,650 | 47,478 | 0,790 | 36,359 | 1,067 | 37,871 | 2,361 |
| 400,00 | 43,363 | 0,677 | 48,937 | 0,815 | 37,181 | 1,091 | 40,489 | 2,524 |
| 450,00 | 45,071 | 0,704 | 50,201 | 0,836 | 38,048 | 1,116 | 43,350 | 2,702 |
| 500,00 | 46,662 | 0,728 | 51,304 | 0,854 | 38,942 | 1,143 | 46,349 | 2,889 |
| 550,00 | 47,994 | 0,749 | 52,286 | 0,870 | 39,843 | 1,169 | 49,309 | 3,074 |
| 600,00 | 49,145 | 0,767 | 53,159 | 0,885 | 40,746 | 1,196 | 52,232 | 3,256 |
| 650,00 | 50,138 | 0,783 | 53,948 | 0,898 | 41,638 | 1,222 | 55,062 | 3,432 |
| 700,00 | 50,998 | 0,796 | 54,660 | 0,910 | 42,516 | 1,247 | 57,798 | 3,603 |
| 750,00 | 51,752 | 0,808 | 55,310 | 0,921 | 43,373 | 1,273 | 60,420 | 3,766 |
| 800,00 | 52,414 | 0,818 | 55,902 | 0,931 | 44,206 | 1,297 | 62,929 | 3,923 |
| 850,00 | 53,003 | 0,827 | 56,446 | 0,940 | 45,016 | 1,321 | 65,319 | 4,071 |
| 900,00 | 53,526 | 0,835 | 56,945 | 0,948 | 45,789 | 1,343 | 67,591 | 4,213 |
| 950,00 | 53,996 | 0,843 | 57,405 | 0,956 | 46,508 | 1,365 | 69,744 | 4,347 |
| 1000,00 | 54,418 | 0,849 | 57,828 | 0,963 | 47,188 | 1,385 | 71,782 | 4,474 |
| 1050,00 | 54,800 | 0,855 | 58,220 | 0,969 | 47,841 | 1,404 | 73,707 | 4,594 |
| 1100,00 | 55,147 | 0,861 | 58,581 | 0,975 | 48,460 | 1,422 | 75,523 | 4,708 |
| 1150,00 | 55,464 | 0,866 | 58,915 | 0,981 | 49,044 | 1,439 | 77,232 | 4,814 |
| 1200,00 | 55,753 | 0,870 | 59,223 | 0,986 | 49,595 | 1,455 | 78,839 | 4,914 |
| 1250,00 | 56,017 | 0,874 | 59,508 | 0,991 | 50,112 | 1,470 | 80,348 | 5,008 |
| 1300,00 | 56,260 | 0,878 | 59,771 | 0,995 | 50,598 | 1,485 | 81,764 | 5,097 |
| 1350,00 | 56,484 | 0,882 | 60,015 | 0,999 | 51,055 | 1,498 | 83,091 | 5,179 |
| 1400,00 | 56,690 | 0,885 | 60,240 | 1,003 | 51,485 | 1,511 | 84,333 | 5,257 |
| 1450,00 | 56,880 | 0,888 | 60,449 | 1,006 | 51,889 | 1,522 | 85,495 | 5,329 |
| 1500,00 | 57,056 | 0,891 | 60,642 | 1,009 | 52,269 | 1,534 | 86,583 | 5,397 |
| 1550,00 | 57,219 | 0,893 | 60,821 | 1,012 | 52,627 | 1,544 | 87,601 | 5,460 |
| 1600,00 | 57,369 | 0,895 | 60,987 | 1,015 | 52,965 | 1,554 | 88,553 | 5,520 |
| 1650,00 | 57,508 | 0,898 | 61,141 | 1,018 | 53,284 | 1,563 | 89,445 | 5,575 |
| 1700,00 | 57,638 | 0,900 | 61,285 | 1,020 | 53,586 | 1,572 | 90,281 | 5,627 |
| 1750,00 | 57,759 | 0,902 | 61,420 | 1,022 | 53,872 | 1,581 | 91,067 | 5,676 |
| 1800,00 | 57,871 | 0,903 | 61,547 | 1,024 | 54,143 | 1,589 | 91,808 | 5,723 |
| 1850,00 | 57,976 | 0,905 | 61,667 | 1,026 | 54,401 | 1,596 | 92,509 | 5,766 |
| 1900,00 | 58,075 | 0,907 | 61,780 | 1,028 | 54,646 | 1,603 | 93,174 | 5,808 |
| 1950,00 | 58,167 | 0,908 | 61,888 | 1,030 | 54,879 | 1,610 | 93,816 | 5,848 |
| 2000,00 | 58,253 | 0,909 | 61,993 | 1,032 | 55,102 | 1,617 | 94,420 | 5,885 |
| 2050,00 | 58,334 | 0,911 | 62,095 | 1,034 | 55,315 | 1,623 | 94,968 | 5,920 |
| 2100,00 | 58,411 | 0,912 | 62,196 | 1,035 | 55,518 | 1,629 | 95,480 | 5,952 |
| 2150,00 | 58,484 | 0,913 | 62,295 | 1,037 | 55,713 | 1,635 | 95,972 | 5,982 |
| 2200,00 | 58,554 | 0,914 | 62,395 | 1,039 | 55,899 | 1,640 | 96,440 | 6,011 |
| 2250,00 | 58,621 | 0,915 | 62,496 | 1,040 | 56,078 | 1,645 | 96,881 | 6,039 |
| 2300,00 | 58,685 | 0,916 | 62,599 | 1,042 | 56,250 | 1,650 | 97,300 | 6,065 |
| 2350,00 | 58,748 | 0,917 | 62,705 | 1,044 | 56,416 | 1,655 | 97,700 | 6,090 |
| 2400,00 | 58,809 | 0,918 | 62,816 | 1,046 | 56,576 | 1,660 | 98,080 | 6,114 |
| 2450,00 | 58,868 | 0,919 | 41,506 | 0,691 | 34,187 | 1,003 | 98,440 | 6,136 |
| 2500,00 | 58,927 | 0,920 | 41,592 | 0,692 | 34,213 | 1,004 | 98,780 | 6,157 |

(Raiko et al. 2002, s. 696.)

| Aine M | C ₂ H ₄ (g) 28,054 kg/kmol | | C ₂ H ₆ (g) 30,070 kg/kmol | | C ₃ H ₈ (g) 44,097 kg/kmol | | C ₄ H ₆ (g) 54,092 kg/kmol | |
|-----------|---|--|---|--|---|--|---|--|
| T [K] | C _p | c _p | C _p | c _p | C _p | c _p | C _p | c _p |
| | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}\right]$ | $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right]$ |
| 298,15 | 42,891 | 1,529 | 52,541 | 1,747 | 73,789 | 1,673 | 116,251 | 2,149 |
| 300,00 | 43,055 | 1,535 | 52,797 | 1,756 | 74,196 | 1,683 | 116,439 | 2,153 |
| 400,00 | 53,038 | 1,891 | 66,065 | 2,197 | 94,893 | 2,152 | 130,211 | 2,407 |
| 500,00 | 62,493 | 2,228 | 78,156 | 2,599 | 113,191 | 2,567 | 148,030 | 2,737 |
| 600,00 | 70,663 | 2,519 | 89,120 | 2,964 | 129,282 | 2,932 | 167,994 | 3,106 |
| 700,00 | 77,713 | 2,770 | 99,012 | 3,293 | 143,358 | 3,251 | 189,451 | 3,502 |
| 800,00 | 83,841 | 2,989 | 107,883 | 3,588 | 155,614 | 3,529 | 212,128 | 3,922 |
| 900,00 | 89,196 | 3,179 | 115,785 | 3,851 | 166,240 | 3,770 | 235,896 | 4,361 |
| 1000,00 | 93,892 | 3,347 | 122,771 | 4,083 | 175,431 | 3,978 | 260,685 | 4,819 |
| 1100,00 | 98,011 | 3,494 | | | 183,379 | 4,159 | 286,457 | 5,296 |
| 1200,00 | 101,625 | 3,622 | | | 190,276 | 4,315 | 313,189 | 5,790 |
| 1300,00 | 104,791 | 3,735 | | | 196,315 | 4,452 | 340,866 | 6,302 |
| 1400,00 | 107,562 | 3,834 | | | 201,690 | 4,574 | 369,479 | 6,831 |
| 1500,00 | 109,986 | 3,921 | | | 206,592 | 4,685 | 399,019 | 7,377 |
| 1600,00 | 112,107 | 3,996 | | | | | 429,484 | 7,940 |
| 1700,00 | 113,969 | 4,062 | | | | | 460,870 | 8,520 |
| 1800,00 | 115,612 | 4,121 | | | | | 493,173 | 9,117 |
| 1900,00 | 117,077 | 4,173 | | | | | | |
| 2000,00 | 118,404 | 4,221 | | | | | | |

(Raiko et al. 2002, s. 697.)

| Aine | kuiva ilma (g) | | O ₂ (g) | | N ₂ (g) | | N _{2r} (g) | |
|--------------|-----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|---------------------|----------------|
| M | 28,9647 kg/kmol | | 31,999 kg/kmol | | 28,013 kg/kmol | | 28,1606 kg/kmol | |
| ΔH_f | -0,126 kJ/mol | | 0,000 kJ/mol | | 0,000 kJ/mol | | -0,157 kJ/mol | |
| T | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t |
| [K] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] |
| 200,00 | -2,852 | -0,098 | -2,870 | -0,090 | -2,860 | -0,102 | -2,848 | -0,101 |
| 250,00 | -1,400 | -0,048 | -1,412 | -0,044 | -1,403 | -0,050 | -1,397 | -0,050 |
| 298,15 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 300,00 | 0,054 | 0,002 | 0,054 | 0,002 | 0,054 | 0,002 | 0,054 | 0,002 |
| 350,00 | 1,511 | 0,052 | 1,531 | 0,048 | 1,511 | 0,054 | 1,506 | 0,053 |
| 400,00 | 2,975 | 0,103 | 3,025 | 0,095 | 2,971 | 0,106 | 2,962 | 0,105 |
| 450,00 | 4,448 | 0,154 | 4,543 | 0,142 | 4,437 | 0,158 | 4,422 | 0,157 |
| 500,00 | 5,932 | 0,205 | 6,084 | 0,190 | 5,911 | 0,211 | 5,891 | 0,209 |
| 550,00 | 7,430 | 0,257 | 7,652 | 0,239 | 7,396 | 0,264 | 7,371 | 0,262 |
| 600,00 | 8,944 | 0,309 | 9,244 | 0,289 | 8,894 | 0,317 | 8,865 | 0,315 |
| 650,00 | 10,475 | 0,362 | 10,860 | 0,339 | 10,408 | 0,372 | 10,373 | 0,368 |
| 700,00 | 12,023 | 0,415 | 12,499 | 0,391 | 11,937 | 0,426 | 11,896 | 0,422 |
| 750,00 | 13,588 | 0,469 | 14,158 | 0,442 | 13,483 | 0,481 | 13,437 | 0,477 |
| 800,00 | 15,171 | 0,524 | 15,836 | 0,495 | 15,046 | 0,537 | 14,994 | 0,532 |
| 850,00 | 16,770 | 0,579 | 17,531 | 0,548 | 16,626 | 0,594 | 16,568 | 0,588 |
| 900,00 | 18,386 | 0,635 | 19,241 | 0,601 | 18,222 | 0,650 | 18,159 | 0,645 |
| 950,00 | 20,017 | 0,691 | 20,965 | 0,655 | 19,835 | 0,708 | 19,765 | 0,702 |
| 1000,00 | 21,662 | 0,748 | 22,703 | 0,709 | 21,463 | 0,766 | 21,385 | 0,759 |
| 1050,00 | 23,322 | 0,805 | 24,452 | 0,764 | 23,105 | 0,825 | 23,021 | 0,817 |
| 1100,00 | 24,994 | 0,863 | 26,212 | 0,819 | 24,760 | 0,884 | 24,669 | 0,876 |
| 1150,00 | 26,678 | 0,921 | 27,982 | 0,874 | 26,428 | 0,943 | 26,331 | 0,935 |
| 1200,00 | 28,373 | 0,980 | 29,761 | 0,930 | 28,109 | 1,003 | 28,004 | 0,994 |
| 1250,00 | 30,080 | 1,038 | 31,549 | 0,986 | 29,801 | 1,064 | 29,688 | 1,054 |
| 1300,00 | 31,796 | 1,098 | 33,344 | 1,042 | 31,503 | 1,125 | 31,383 | 1,114 |
| 1350,00 | 33,521 | 1,157 | 35,147 | 1,098 | 33,215 | 1,186 | 33,088 | 1,175 |
| 1400,00 | 35,256 | 1,217 | 36,957 | 1,155 | 34,936 | 1,247 | 34,802 | 1,236 |
| 1450,00 | 36,998 | 1,277 | 38,774 | 1,212 | 36,666 | 1,309 | 36,524 | 1,297 |
| 1500,00 | 38,749 | 1,338 | 40,598 | 1,269 | 38,405 | 1,371 | 38,255 | 1,358 |
| 1550,00 | 40,506 | 1,398 | 42,429 | 1,326 | 40,151 | 1,433 | 39,993 | 1,420 |
| 1600,00 | 42,271 | 1,459 | 44,266 | 1,383 | 41,904 | 1,496 | 41,738 | 1,482 |
| 1650,00 | 44,042 | 1,521 | 46,108 | 1,441 | 43,663 | 1,559 | 43,489 | 1,544 |
| 1700,00 | 45,819 | 1,582 | 47,957 | 1,499 | 45,429 | 1,622 | 45,247 | 1,607 |
| 1750,00 | 47,602 | 1,643 | 49,812 | 1,557 | 47,201 | 1,685 | 47,011 | 1,669 |
| 1800,00 | 49,391 | 1,705 | 51,673 | 1,615 | 48,978 | 1,748 | 48,780 | 1,732 |
| 1850,00 | 51,185 | 1,767 | 53,540 | 1,673 | 50,761 | 1,812 | 50,554 | 1,795 |
| 1900,00 | 52,984 | 1,829 | 55,413 | 1,732 | 52,548 | 1,876 | 52,333 | 1,858 |
| 1950,00 | 54,788 | 1,892 | 57,292 | 1,790 | 54,340 | 1,940 | 54,117 | 1,922 |
| 2000,00 | 56,597 | 1,954 | 59,176 | 1,849 | 56,137 | 2,004 | 55,905 | 1,985 |
| 2050,00 | 58,410 | 2,017 | 61,066 | 1,908 | 57,938 | 2,068 | 57,697 | 2,049 |
| 2100,00 | 60,228 | 2,079 | 62,961 | 1,968 | 59,742 | 2,133 | 59,492 | 2,113 |
| 2150,00 | 62,049 | 2,142 | 64,862 | 2,027 | 61,550 | 2,197 | 61,292 | 2,177 |
| 2200,00 | 63,875 | 2,205 | 66,769 | 2,087 | 63,361 | 2,262 | 63,095 | 2,241 |
| 2250,00 | 65,704 | 2,268 | 68,682 | 2,146 | 65,176 | 2,327 | 64,901 | 2,305 |
| 2300,00 | 67,537 | 2,332 | 70,600 | 2,206 | 66,994 | 2,392 | 66,711 | 2,369 |
| 2350,00 | 69,374 | 2,395 | 72,524 | 2,266 | 68,816 | 2,457 | 68,523 | 2,433 |
| 2400,00 | 71,214 | 2,459 | 74,453 | 2,327 | 70,640 | 2,522 | 70,339 | 2,498 |
| 2450,00 | 73,057 | 2,522 | 76,387 | 2,387 | 72,467 | 2,587 | 72,157 | 2,562 |
| 2500,00 | 74,904 | 2,586 | 78,327 | 2,448 | 74,296 | 2,652 | 73,977 | 2,627 |

(Raiko et al. 2002, s. 698.)

| Aine | CO ₂ (g) | | CO (g) | | H ₂ O (g) | | H ₂ (g) | |
|-----------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------|----------------|--------------------|----------------|
| M | 44,010 kg/kmol | | 28,010 kg/kmol | | 18,015 kg/kmol | | 2,016 kg/kmol | |
| ΔH _f | -393,505 kJ/mol | | -110,541 kJ/mol | | -241,826 kJ/mol | | 0,000 kJ/mol | |
| T | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t |
| [K] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] |
| 200,00 | -3,410 | -0,077 | -2,870 | -0,102 | -3,280 | -0,182 | -2,770 | -1,374 |
| 250,00 | -1,726 | -0,039 | -1,409 | -0,050 | -1,613 | -0,090 | -1,371 | -0,680 |
| 298,15 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 300,00 | 0,069 | 0,002 | 0,054 | 0,002 | 0,062 | 0,003 | 0,053 | 0,026 |
| 350,00 | 1,985 | 0,045 | 1,514 | 0,054 | 1,748 | 0,097 | 1,500 | 0,744 |
| 400,00 | 4,004 | 0,091 | 2,977 | 0,106 | 3,451 | 0,192 | 2,959 | 1,468 |
| 450,00 | 6,114 | 0,139 | 4,449 | 0,159 | 5,176 | 0,287 | 4,419 | 2,192 |
| 500,00 | 8,307 | 0,189 | 5,932 | 0,212 | 6,924 | 0,384 | 5,882 | 2,918 |
| 550,00 | 10,574 | 0,240 | 7,429 | 0,265 | 8,698 | 0,483 | 7,346 | 3,644 |
| 600,00 | 12,909 | 0,293 | 8,942 | 0,319 | 10,500 | 0,583 | 8,811 | 4,371 |
| 650,00 | 15,304 | 0,348 | 10,473 | 0,374 | 12,331 | 0,684 | 10,279 | 5,098 |
| 700,00 | 17,756 | 0,403 | 12,023 | 0,429 | 14,191 | 0,788 | 11,749 | 5,828 |
| 750,00 | 20,259 | 0,460 | 13,591 | 0,485 | 16,081 | 0,893 | 13,223 | 6,559 |
| 800,00 | 22,809 | 0,518 | 15,177 | 0,542 | 18,001 | 0,999 | 14,702 | 7,293 |
| 850,00 | 25,401 | 0,577 | 16,781 | 0,599 | 19,953 | 1,108 | 16,186 | 8,029 |
| 900,00 | 28,033 | 0,637 | 18,401 | 0,657 | 21,937 | 1,218 | 17,676 | 8,768 |
| 950,00 | 30,700 | 0,698 | 20,038 | 0,715 | 23,952 | 1,330 | 19,174 | 9,511 |
| 1000,00 | 33,400 | 0,759 | 21,690 | 0,774 | 25,999 | 1,443 | 20,680 | 10,258 |
| 1050,00 | 36,130 | 0,821 | 23,356 | 0,834 | 28,079 | 1,559 | 22,195 | 11,009 |
| 1100,00 | 38,888 | 0,884 | 25,035 | 0,894 | 30,190 | 1,676 | 23,719 | 11,765 |
| 1150,00 | 41,671 | 0,947 | 26,727 | 0,954 | 32,332 | 1,795 | 25,253 | 12,526 |
| 1200,00 | 44,477 | 1,011 | 28,430 | 1,015 | 34,505 | 1,915 | 26,797 | 13,292 |
| 1250,00 | 47,304 | 1,075 | 30,144 | 1,076 | 36,708 | 2,038 | 28,352 | 14,064 |
| 1300,00 | 50,151 | 1,140 | 31,867 | 1,138 | 38,941 | 2,162 | 29,918 | 14,840 |
| 1350,00 | 53,017 | 1,205 | 33,600 | 1,200 | 41,203 | 2,287 | 31,495 | 15,622 |
| 1400,00 | 55,899 | 1,270 | 35,342 | 1,262 | 43,492 | 2,414 | 33,082 | 16,410 |
| 1450,00 | 58,797 | 1,336 | 37,092 | 1,324 | 45,808 | 2,543 | 34,681 | 17,203 |
| 1500,00 | 61,709 | 1,402 | 38,850 | 1,387 | 48,150 | 2,673 | 36,290 | 18,001 |
| 1550,00 | 64,635 | 1,469 | 40,614 | 1,450 | 50,516 | 2,804 | 37,910 | 18,805 |
| 1600,00 | 67,573 | 1,535 | 42,385 | 1,513 | 52,907 | 2,937 | 39,541 | 19,614 |
| 1650,00 | 70,522 | 1,602 | 44,162 | 1,577 | 55,321 | 3,071 | 41,183 | 20,428 |
| 1700,00 | 73,483 | 1,670 | 45,945 | 1,640 | 57,757 | 3,206 | 42,835 | 21,248 |
| 1750,00 | 76,454 | 1,737 | 47,733 | 1,704 | 60,214 | 3,342 | 44,497 | 22,072 |
| 1800,00 | 79,435 | 1,805 | 49,526 | 1,768 | 62,692 | 3,480 | 46,168 | 22,901 |
| 1850,00 | 82,425 | 1,873 | 51,324 | 1,832 | 65,189 | 3,619 | 47,850 | 23,735 |
| 1900,00 | 85,423 | 1,941 | 53,126 | 1,897 | 67,704 | 3,758 | 49,541 | 24,574 |
| 1950,00 | 88,429 | 2,009 | 54,933 | 1,961 | 70,238 | 3,899 | 51,242 | 25,417 |
| 2000,00 | 91,443 | 2,078 | 56,744 | 2,026 | 72,789 | 4,040 | 52,951 | 26,265 |
| 2050,00 | 94,464 | 2,146 | 58,558 | 2,091 | 75,357 | 4,183 | 54,669 | 27,118 |
| 2100,00 | 97,492 | 2,215 | 60,376 | 2,156 | 77,940 | 4,326 | 56,396 | 27,974 |
| 2150,00 | 100,526 | 2,284 | 62,197 | 2,221 | 80,538 | 4,471 | 58,131 | 28,835 |
| 2200,00 | 103,566 | 2,353 | 64,021 | 2,286 | 83,151 | 4,616 | 59,875 | 29,700 |
| 2250,00 | 106,612 | 2,422 | 65,849 | 2,351 | 85,778 | 4,761 | 61,627 | 30,569 |
| 2300,00 | 109,664 | 2,492 | 67,679 | 2,416 | 88,419 | 4,908 | 63,386 | 31,441 |
| 2350,00 | 112,721 | 2,561 | 69,512 | 2,482 | 91,073 | 5,055 | 65,153 | 32,318 |
| 2400,00 | 115,783 | 2,631 | 71,348 | 2,547 | 93,739 | 5,203 | 66,928 | 33,198 |
| 2450,00 | 118,850 | 2,701 | 73,186 | 2,613 | 96,417 | 5,352 | 68,710 | 34,082 |
| 2500,00 | 121,921 | 2,770 | 75,027 | 2,679 | 99,107 | 5,501 | 70,498 | 34,969 |

(Raiko et al. 2002, s. 699.)

| Aine | SO ₂ (g) | | COS (g) | | H ₂ S (g) | | CH ₄ (g) | |
|-----------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------|----------------|---------------------|----------------|
| M | 64,065 kg/kmol | | 60,076 kg/kmol | | 34,082 kg/kmol | | 16,043 kg/kmol | |
| ΔH _f | -296,813 kJ/mol | | -138,407 kJ/mol | | -20,502 kJ/mol | | -74,873 kJ/mol | |
| T | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t |
| [K] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] |
| 200,00 | -0,058 | -0,004 | | | | | -3,370 | -0,210 |
| 250,00 | -0,029 | -0,002 | | | | | -1,681 | -0,105 |
| 298,15 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 300,00 | 0,074 | 0,001 | 0,077 | 0,001 | 0,063 | 0,002 | 0,066 | 0,004 |
| 350,00 | 2,103 | 0,033 | 2,214 | 0,037 | 1,790 | 0,053 | 1,906 | 0,119 |
| 400,00 | 4,228 | 0,066 | 4,455 | 0,074 | 3,552 | 0,104 | 3,858 | 0,240 |
| 450,00 | 6,442 | 0,101 | 6,787 | 0,113 | 5,351 | 0,157 | 5,956 | 0,371 |
| 500,00 | 8,736 | 0,136 | 9,199 | 0,153 | 7,189 | 0,211 | 8,197 | 0,511 |
| 550,00 | 11,103 | 0,173 | 11,677 | 0,194 | 9,070 | 0,266 | 10,590 | 0,660 |
| 600,00 | 13,533 | 0,211 | 14,216 | 0,237 | 10,994 | 0,323 | 13,128 | 0,818 |
| 650,00 | 16,015 | 0,250 | 16,806 | 0,280 | 12,964 | 0,380 | 15,811 | 0,986 |
| 700,00 | 18,544 | 0,289 | 19,443 | 0,324 | 14,978 | 0,439 | 18,633 | 1,161 |
| 750,00 | 21,113 | 0,330 | 22,121 | 0,368 | 17,038 | 0,500 | 21,589 | 1,346 |
| 800,00 | 23,718 | 0,370 | 24,836 | 0,413 | 19,142 | 0,562 | 24,673 | 1,538 |
| 850,00 | 26,353 | 0,411 | 27,585 | 0,459 | 21,289 | 0,625 | 27,880 | 1,738 |
| 900,00 | 29,017 | 0,453 | 30,366 | 0,505 | 23,479 | 0,689 | 31,203 | 1,945 |
| 950,00 | 31,705 | 0,495 | 33,175 | 0,552 | 25,710 | 0,754 | 34,637 | 2,159 |
| 1000,00 | 34,416 | 0,537 | 36,010 | 0,599 | 27,980 | 0,821 | 38,175 | 2,380 |
| 1050,00 | 37,146 | 0,580 | 38,869 | 0,647 | 30,287 | 0,889 | 41,813 | 2,606 |
| 1100,00 | 39,895 | 0,623 | 41,750 | 0,695 | 32,629 | 0,957 | 45,544 | 2,839 |
| 1150,00 | 42,660 | 0,666 | 44,651 | 0,743 | 35,005 | 1,027 | 49,363 | 3,077 |
| 1200,00 | 45,441 | 0,709 | 47,571 | 0,792 | 37,413 | 1,098 | 53,266 | 3,320 |
| 1250,00 | 48,236 | 0,753 | 50,508 | 0,841 | 39,851 | 1,169 | 57,246 | 3,568 |
| 1300,00 | 51,043 | 0,797 | 53,462 | 0,890 | 42,317 | 1,242 | 61,299 | 3,821 |
| 1350,00 | 53,862 | 0,841 | 56,431 | 0,939 | 44,809 | 1,315 | 65,421 | 4,078 |
| 1400,00 | 56,691 | 0,885 | 59,413 | 0,989 | 47,327 | 1,389 | 69,607 | 4,339 |
| 1450,00 | 59,530 | 0,929 | 62,408 | 1,039 | 49,869 | 1,463 | 73,853 | 4,603 |
| 1500,00 | 62,378 | 0,974 | 65,414 | 1,089 | 52,433 | 1,538 | 78,155 | 4,872 |
| 1550,00 | 65,235 | 1,018 | 68,432 | 1,139 | 55,017 | 1,614 | 82,510 | 5,143 |
| 1600,00 | 68,100 | 1,063 | 71,459 | 1,189 | 57,621 | 1,691 | 86,914 | 5,418 |
| 1650,00 | 70,972 | 1,108 | 74,495 | 1,240 | 60,243 | 1,768 | 91,364 | 5,695 |
| 1700,00 | 73,851 | 1,153 | 77,540 | 1,291 | 62,883 | 1,845 | 95,858 | 5,975 |
| 1750,00 | 76,736 | 1,198 | 80,593 | 1,342 | 65,539 | 1,923 | 100,392 | 6,258 |
| 1800,00 | 79,626 | 1,243 | 83,654 | 1,392 | 68,211 | 2,001 | 104,964 | 6,543 |
| 1850,00 | 82,522 | 1,288 | 86,722 | 1,444 | 70,897 | 2,080 | 109,572 | 6,830 |
| 1900,00 | 85,424 | 1,333 | 89,796 | 1,495 | 73,598 | 2,159 | 114,214 | 7,119 |
| 1950,00 | 88,330 | 1,379 | 92,877 | 1,546 | 76,312 | 2,239 | 118,889 | 7,411 |
| 2000,00 | 91,241 | 1,424 | 95,963 | 1,597 | 79,038 | 2,319 | 123,594 | 7,704 |
| 2050,00 | 94,156 | 1,470 | 99,055 | 1,649 | 81,776 | 2,399 | 128,328 | 7,999 |
| 2100,00 | 97,074 | 1,515 | 102,152 | 1,700 | 84,526 | 2,480 | 133,090 | 8,296 |
| 2150,00 | 99,996 | 1,561 | 105,254 | 1,752 | 87,286 | 2,561 | 137,879 | 8,594 |
| 2200,00 | 102,922 | 1,607 | 108,361 | 1,804 | 90,057 | 2,642 | 142,690 | 8,894 |
| 2250,00 | 105,851 | 1,652 | 111,474 | 1,856 | 92,838 | 2,724 | 147,519 | 9,195 |
| 2300,00 | 108,784 | 1,698 | 114,591 | 1,907 | 95,628 | 2,806 | 152,370 | 9,498 |
| 2350,00 | 111,720 | 1,744 | 117,713 | 1,959 | 98,425 | 2,888 | 157,244 | 9,801 |
| 2400,00 | 114,659 | 1,790 | 120,840 | 2,011 | 101,230 | 2,970 | 162,140 | 10,107 |
| 2450,00 | 117,601 | 1,836 | 123,973 | 2,064 | 104,045 | 3,053 | 167,056 | 10,413 |
| 2500,00 | 120,546 | 1,882 | 127,111 | 2,116 | 106,870 | 3,136 | 171,990 | 10,721 |

(Raiko et al. 2002, s. 700.)

| Aine | C ₂ H ₄ (g) | | C ₂ H ₆ (g) | | C ₃ H ₈ (g) | | C ₄ H ₁₀ (g) | |
|-----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
| M | 28,054 kg/kmol | | 30,070 kg/kmol | | 44,097 kg/kmol | | 58,125 kg/kmol | |
| ΔH _f | 52,467 kJ/mol | | -84,684 kJ/mol | | -103,847 kJ/mol | | -126,163 kJ/mol | |
| T | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t | H _{mt} | h _t |
| [K] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] | [kJ/mol] | [MJ/kg] |
| 298,15 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 300,00 | 0,079 | 0,003 | 0,097 | 0,003 | 0,137 | 0,003 | 0,215 | 0,004 |
| 400,00 | 4,876 | 0,174 | 6,051 | 0,201 | 8,612 | 0,195 | 12,498 | 0,231 |
| 500,00 | 10,664 | 0,380 | 13,271 | 0,441 | 19,036 | 0,432 | 26,388 | 0,488 |
| 600,00 | 17,332 | 0,618 | 21,644 | 0,720 | 31,177 | 0,707 | 42,175 | 0,780 |
| 700,00 | 24,759 | 0,883 | 31,060 | 1,033 | 44,825 | 1,017 | 60,036 | 1,110 |
| 800,00 | 32,843 | 1,171 | 41,413 | 1,377 | 59,788 | 1,356 | 80,106 | 1,481 |
| 900,00 | 41,501 | 1,479 | 52,604 | 1,749 | 75,893 | 1,721 | 102,498 | 1,895 |
| 1000,00 | 50,661 | 1,806 | 64,539 | 2,146 | 92,988 | 2,109 | 127,319 | 2,354 |
| 1100,00 | 60,260 | 2,148 | | | 110,938 | 2,516 | 154,668 | 2,859 |
| 1200,00 | 70,246 | 2,504 | | | 129,629 | 2,940 | 184,642 | 3,413 |
| 1300,00 | 80,570 | 2,872 | | | 148,964 | 3,378 | 217,337 | 4,018 |
| 1400,00 | 91,191 | 3,251 | | | 168,869 | 3,829 | 252,847 | 4,674 |
| 1500,00 | 102,071 | 3,638 | | | 189,287 | 4,293 | 291,264 | 5,385 |
| 1600,00 | 113,178 | 4,034 | | | | | 332,681 | 6,150 |
| 1700,00 | 124,484 | 4,437 | | | | | 377,191 | 6,973 |
| 1800,00 | 135,965 | 4,847 | | | | | 424,886 | 7,855 |
| 1900,00 | 147,601 | 5,261 | | | | | | |
| 2000,00 | 159,376 | 5,681 | | | | | | |

(Raiko et al. 2002, s. 701.)

LIITE 5: KAASUJEN MOOLIMASSAT JA KAASUVAKIOT

| Aine (g) | M [kg/kmol] | R [kJ/kgK] |
|------------------|----------------|---------------|
| Ar | 39,948 | 0,20813 |
| Ne | 20,179 | 0,41204 |
| N ₂ | 28,0134 | 0,29680 |
| O ₂ | 31,9988 | 0,25984 |
| CO | 28,010 | 0,29684 |
| CO ₂ | 44,010 | 0,18892 |
| H ₂ O | 18,0153 | 0,46152 |
| SO ₂ | 64,065 | 0,12978 |

(Raiko et al. 2002, s. 705.)

LIITE 6: OMINAISLÄMPÖSOVITTEEN C_K KER- TOIMET

| | Ar (g) | Ne (g) | N ₂ (g) | O ₂ (g) | CO (g) |
|-----------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| C ₁ | 0,00000000 | 0,00000000 | 0,00164340 | -0,00189585 | 0,00017759 |
| C ₂ | 0,00000000 | 0,00000000 | -0,04274719 | 0,04371806 | -0,01034931 |
| C ₃ | 0,00000000 | 0,00000000 | 0,4740299 | -0,41739739 | 0,17496506 |
| C ₄ | 0,00000000 | 0,00000000 | -2,91664302 | 2,10481941 | -1,42327358 |
| C ₅ | 0,00000000 | 0,00000000 | 10,83900885 | -5,87819525 | 6,47159115 |
| C ₆ | 2,50000000 | 2,50000000 | -21,32837202 | 12,12251612 | -13,69763772 |
| C ₇ | 0,00000000 | 0,00000000 | 34,52790531 | -5,87962701 | 26,49409514 |
| C ₈ | 0,00000000 | 0,00000000 | -28,62924390 | 2,69840170 | -23,22849765 |
| C ₉ | 0,00000000 | 0,00000000 | 15,10308970 | -0,68993446 | 12,76382132 |
| C ₁₀ | 0,00000000 | 0,00000000 | -4,93351644 | 0,10037770 | -4,30111419 |
| C ₁₁ | 0,00000000 | 0,00000000 | 0,90965480 | -0,00790333 | 0,81268294 |
| C ₁₂ | 0,00000000 | 0,00000000 | -0,07232233 | 0,00027607 | -0,06589677 |
| | CO ₂ (g) | H ₂ O (g) | SO ₂ (g) | kuiva ilma | N _{2r} (g) |
| C ₁ | 0,00113157 | -0,00201690 | -0,00161344 | 0,00088645 | 0,00162372 |
| C ₂ | -0,02866195 | 0,05324806 | 0,04413487 | -0,02422986 | -0,04223503 |
| C ₃ | 0,30486185 | -0,59025452 | -0,50616568 | 0,28282887 | 0,46837806 |
| C ₄ | -1,74052745 | 3,57748654 | 3,14295865 | -1,83707321 | -2,88161284 |
| C ₅ | 5,78930467 | -12,97778482 | -11,34774478 | 7,23402808 | 10,70855596 |
| C ₆ | -9,35341573 | 33,32045416 | 27,31525171 | -14,09423063 | -21,04123409 |
| C ₇ | 24,07693004 | -42,64731893 | -23,53035037 | 25,73683409 | 34,11459871 |
| C ₈ | -20,43950165 | 41,39089229 | 18,23521404 | -21,79615798 | -28,28673591 |
| C ₉ | 10,87536887 | -23,96053283 | -9,27071381 | 11,65205950 | 14,92243989 |
| C ₁₀ | -3,55576585 | 8,22692113 | 2,97493964 | -3,83240104 | -4,87450738 |
| C ₁₁ | 0,65385727 | -1,55193837 | -0,54425032 | 0,70884911 | 0,89877385 |
| C ₁₂ | -0,05176162 | 0,12417097 | 0,04316689 | -0,05643095 | 0,07145715 |

(Raiko et al. 2002, s. 706.)

LIITE 7: PALAMISILMAN JA SAVUKAASUJEN TAULUKKOENTALPIAT

| | | | |
|---------------------|----------------|---|-----------------|
| ilma N ₂ | mol % 78,09 | C _n H _{2n} palamiskaasut N ₂ | mol % 72,991 |
| luft O ₂ | 20,95 | förbränningsgaser A | 0,869 |
| Luft A | 0,93 | Verbrennungsgase CO ₂ | 13,083 |
| air CO ₂ | 0,03 | combustion gases H ₂ O | 13,055 |

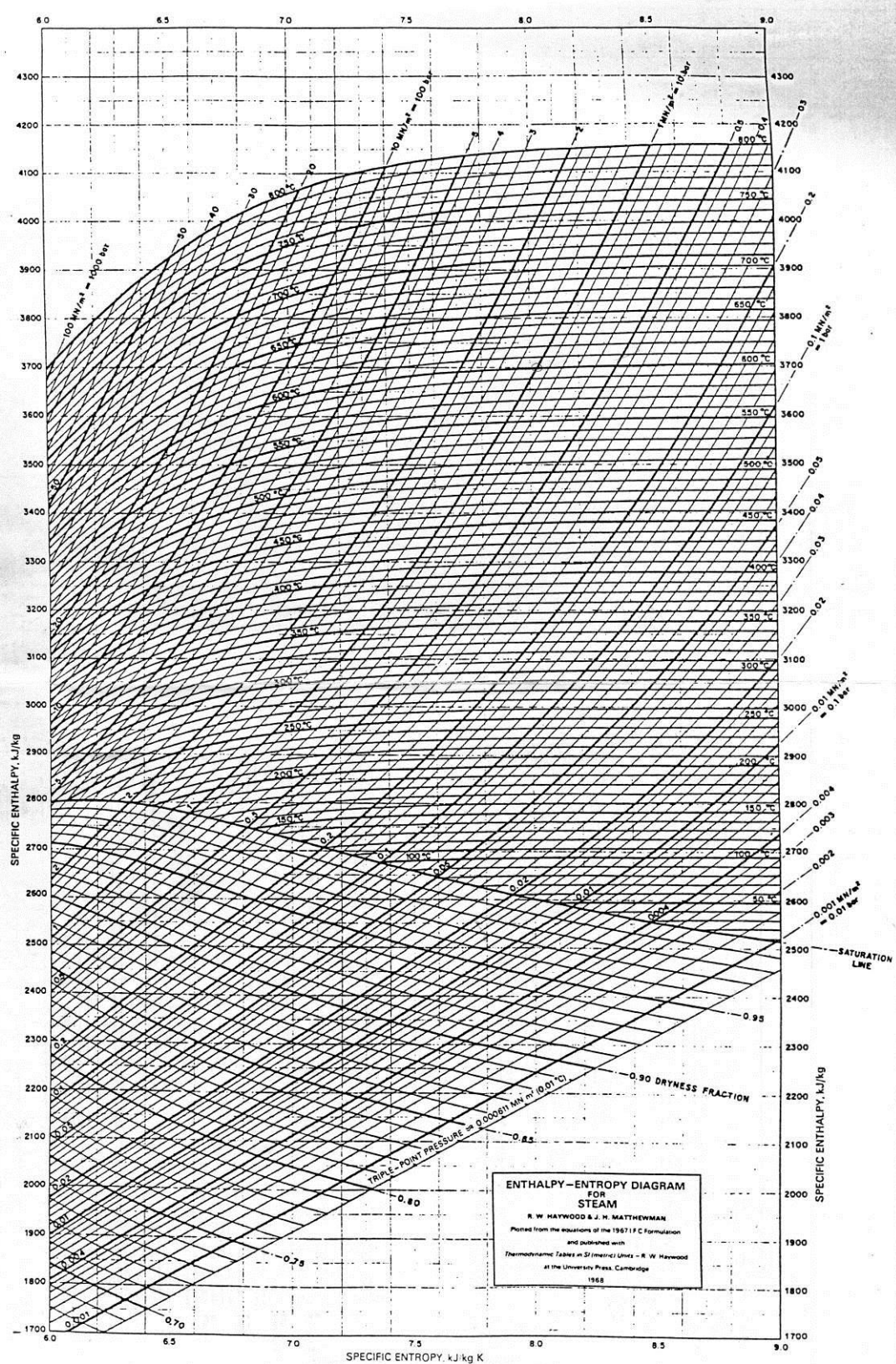
| <i>T</i> | <i>C_{pm}</i> | <i>H_m–H_{mB}</i> | <i>S_{m1}</i> | <i>C_{pm}</i> | <i>H_m–H_{mB}</i> | <i>S_{m1}</i> |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| MJ/kmol | | MJ/kmol | | | MJ/kmol | |
| 0,5 | 3,4914 | –6,9860 | 18,320 | 3,5577 | –7,2108 | 18,369 |
| 0,6 | 3,4913 | –6,6369 | 18,956 | 3,5577 | –6,8551 | 19,018 |
| 0,7 | 3,4913 | –6,2877 | 19,495 | 3,5580 | –6,4993 | 19,566 |
| 0,8 | 3,4913 | –5,9386 | 19,961 | 3,5589 | –6,1435 | 20,041 |
| 0,9 | 3,4914 | –5,5894 | 20,372 | 3,5607 | –5,7875 | 20,460 |
| 1,0 | 3,4914 | –5,2403 | 20,740 | 3,5635 | –5,4312 | 20,835 |
| 1,1 | 3,4914 | –4,8912 | 21,072 | 3,5676 | –5,0748 | 21,175 |
| 1,2 | 3,4915 | –4,5420 | 21,377 | 3,5730 | –4,7177 | 21,486 |
| 1,3 | 3,4916 | –4,1929 | 21,656 | 3,5795 | –4,3601 | 21,772 |
| 1,4 | 3,4917 | –3,8438 | 21,915 | 3,5869 | –4,0018 | 22,038 |
| 1,5 | 3,4918 | –3,4945 | 22,156 | 3,5951 | –3,6426 | 22,285 |
| 1,6 | 3,4920 | –3,1455 | 22,381 | 3,6040 | –3,2828 | 22,518 |
| 1,7 | 3,4922 | –2,7961 | 22,593 | 3,6132 | –2,9219 | 22,736 |
| 1,8 | 3,4927 | –2,4469 | 22,792 | 3,6228 | –2,5601 | 22,943 |
| 1,9 | 3,4931 | –2,0976 | 22,981 | 3,6325 | –2,1973 | 23,140 |
| 2,0 | 3,4938 | –1,7482 | 23,160 | 3,6424 | –1,8335 | 23,326 |
| 2,1 | 3,4947 | –1,3989 | 23,331 | 3,6523 | –1,4689 | 23,504 |
| 2,2 | 3,4958 | –1,0494 | 23,493 | 3,6623 | –1,1031 | 23,674 |
| 2,3 | 3,4971 | –0,69962 | 23,649 | 3,6722 | –0,73631 | 23,837 |
| 2,4 | 3,4987 | –0,34985 | 23,798 | 3,6822 | –0,36862 | 23,994 |
| 2,5 | 3,5006 | –0,00000 | 23,941 | 3,6922 | –0,00001 | 24,144 |
| 2,6 | 3,5029 | 0,35021 | 24,078 | 3,7022 | 0,36975 | 24,289 |
| 2,7 | 3,5055 | 0,70064 | 24,210 | 3,7123 | 0,74052 | 24,429 |
| 2,8 | 3,5085 | 1,0513 | 24,338 | 3,7224 | 1,1122 | 24,564 |
| 2,9 | 3,5118 | 1,4023 | 24,461 | 3,7326 | 1,4850 | 24,695 |
| 3,0 | 3,5156 | 1,7538 | 24,580 | 3,7430 | 1,8589 | 24,822 |
| 3,1 | 3,5196 | 2,1056 | 24,695 | 3,7534 | 2,2336 | 24,945 |
| 3,2 | 3,5242 | 2,4576 | 24,807 | 3,7640 | 2,6094 | 25,063 |
| 3,3 | 3,5292 | 2,8104 | 24,916 | 3,7748 | 2,9864 | 25,180 |
| 3,4 | 3,5344 | 3,1636 | 25,021 | 3,7856 | 3,3645 | 25,293 |
| 3,5 | 3,5402 | 3,5172 | 25,124 | 3,7967 | 3,7435 | 25,403 |
| 3,6 | 3,5463 | 3,8716 | 25,223 | 3,8079 | 4,1239 | 25,510 |
| 3,7 | 3,5528 | 4,2265 | 25,321 | 3,8194 | 4,5051 | 25,614 |
| 3,8 | 3,5595 | 4,5822 | 25,415 | 3,8309 | 4,8877 | 25,716 |
| 3,9 | 3,5668 | 4,9383 | 25,508 | 3,8427 | 5,2713 | 25,816 |
| 4,0 | 3,5741 | 5,2954 | 25,599 | 3,8545 | 5,6562 | 25,913 |
| 4,1 | 3,5820 | 5,6533 | 25,686 | | | |
| 4,2 | 3,5901 | 6,0119 | 25,773 | | | |
| 4,3 | 3,5984 | 6,3713 | 25,858 | | | |
| 4,4 | 3,6070 | 6,7316 | 25,941 | | | |
| 4,5 | 3,6158 | 7,0928 | 26,022 | 3,9164 | 7,5988 | 26,371 |
| 4,6 | 3,6248 | 7,4548 | 26,101 | | | |
| 4,7 | 3,6340 | 7,8177 | 26,180 | | | |
| 4,8 | 3,6434 | 8,1815 | 26,256 | | | |
| 4,9 | 3,6529 | 8,5464 | 26,331 | | | |
| 5,0 | 3,6627 | 8,9121 | 26,405 | | | |
| 5,1 | 3,6724 | 9,2789 | 26,478 | 3,9812 | 9,5731 | 26,787 |
| 5,2 | 3,6824 | 9,6466 | 26,549 | | | |
| 5,3 | 3,6923 | 10,015 | 26,620 | | | |
| 5,4 | 3,7022 | 10,385 | 26,688 | | | |
| 5,5 | 3,7124 | 10,756 | 26,756 | 4,0474 | 11,580 | 27,169 |
| 5,6 | 3,7224 | 11,127 | 26,824 | | | |
| 5,7 | 3,7326 | 11,500 | 26,890 | | | |
| 5,8 | 3,7426 | 11,874 | 26,955 | | | |

(Raiko 2013.)

| T | C_{pm} | $H_m - H_{mB}$ | S_{ml} | C_{pm} | $H_m - H_{mB}$ | S_{ml} |
|---------|----------|----------------|----------|----------|----------------|----------|
| MJ/kmol | | MJ/kmol | | | MJ/kmol | |
| 5,9 | 3,7528 | 12,249 | 27,019 | | | |
| 6,0 | 3,7628 | 12,625 | 27,082 | | | |
| 6,1 | 3,7729 | 13,001 | 27,144 | 4,1135 | 13,620 | 27,525 |
| 6,2 | 3,7830 | 13,379 | 27,206 | | | |
| 6,3 | 3,7929 | 13,758 | 27,266 | | | |
| 6,4 | 3,8029 | 14,137 | 27,326 | | | |
| 6,5 | 3,8127 | 14,518 | 27,385 | 4,1787 | 15,693 | 27,856 |
| 6,6 | 3,8225 | 14,901 | 27,444 | | | |
| 6,7 | 3,8321 | 15,283 | 27,500 | | | |
| 6,8 | 3,8418 | 15,441 | 27,558 | | | |
| 6,9 | 3,8513 | 16,053 | 27,614 | | | |
| 7,0 | 3,8608 | 16,438 | 27,669 | 4,2417 | 16,596 | 28,168 |
| 7,5 | 3,9065 | 18,476 | 27,937 | 4,3021 | 19,967 | 28,463 |
| 8,0 | 3,9494 | 20,344 | 28,190 | 4,3595 | 22,100 | 28,742 |
| 8,5 | 3,9895 | 22,328 | 28,431 | 4,4137 | 24,294 | 29,008 |
| 9,0 | 4,0269 | 24,332 | 28,660 | 4,4647 | 26,513 | 29,262 |
| 9,5 | 4,0613 | 26,355 | 28,879 | 4,5124 | 28,758 | 29,505 |
| 10,0 | 4,0932 | 28,393 | 29,088 | 4,5571 | 31,025 | 29,737 |
| 10,5 | 4,1226 | 30,447 | 29,289 | 4,5988 | 33,314 | 29,961 |
| 11,0 | 4,1500 | 32,515 | 29,481 | 4,6377 | 35,624 | 30,176 |
| 11,5 | 4,1752 | 34,596 | 29,666 | 4,6738 | 37,951 | 30,382 |
| 12,0 | 4,1987 | 36,690 | 29,844 | 4,7076 | 40,297 | 30,582 |
| 12,5 | 4,2206 | 38,795 | 30,016 | 4,7391 | 42,659 | 30,775 |
| 13,0 | 4,2409 | 40,910 | 30,182 | 4,7684 | 45,036 | 30,962 |
| 13,5 | 4,2599 | 43,036 | 30,343 | 4,7959 | 47,427 | 31,142 |
| 14,0 | 4,2778 | 45,170 | 30,497 | 4,8216 | 49,832 | 31,317 |
| 14,5 | 4,2946 | 47,313 | 30,648 | 4,8455 | 52,248 | 31,487 |
| 15,0 | 4,3103 | 49,465 | 30,794 | 4,8679 | 54,677 | 31,651 |
| 15,5 | 4,3252 | 51,623 | 30,935 | 4,8890 | 57,116 | 31,811 |
| 16,0 | 4,3394 | 53,789 | 31,073 | 4,9088 | 59,565 | 31,966 |
| 16,5 | 4,3528 | 55,963 | 31,207 | 4,9273 | 62,025 | 32,118 |
| 17,0 | 4,3655 | 58,142 | 31,337 | 4,9448 | 64,493 | 32,265 |
| 17,5 | 4,3777 | 60,329 | 31,464 | 4,9613 | 66,970 | 32,409 |
| 18,0 | 4,3893 | 62,520 | 31,588 | 4,9768 | 69,454 | 32,549 |
| 18,5 | 4,4004 | 64,717 | 31,708 | 4,9914 | 71,946 | 32,685 |
| 19,0 | 4,4109 | 66,920 | 31,825 | 5,0052 | 74,445 | 32,819 |
| 19,5 | 4,4212 | 69,128 | 31,939 | 5,0184 | 76,951 | 32,948 |
| 20,0 | 4,4310 | 71,341 | 32,051 | 5,0308 | 79,463 | 33,076 |
| 20,5 | 4,4405 | 73,559 | 32,161 | 5,0426 | 81,982 | 33,200 |
| 21,0 | 4,4496 | 75,782 | 32,268 | 5,0538 | 84,506 | 33,322 |
| 21,5 | 4,4583 | 78,008 | 32,373 | 5,0645 | 87,035 | 33,441 |
| 22,0 | 4,4668 | 80,240 | 32,476 | 5,0748 | 89,570 | 33,558 |
| 22,5 | 4,4748 | 82,476 | 32,576 | 5,0844 | 92,110 | 33,672 |
| 23,0 | 4,4827 | 84,715 | 32,674 | 5,0937 | 94,654 | 33,783 |
| 23,5 | 4,4904 | 86,958 | 32,772 | 5,1027 | 97,203 | 33,893 |
| 24,0 | 4,4977 | 89,205 | 32,866 | 5,1112 | 99,757 | 34,001 |
| 24,5 | 4,5048 | 91,456 | 32,959 | 5,1193 | 102,31 | 34,106 |
| 25,0 | 4,5117 | 93,710 | 33,050 | 5,1272 | 104,88 | 34,210 |
| 25,5 | 4,5183 | 95,968 | 33,139 | 5,1347 | 107,44 | 34,311 |
| 26,0 | 4,5248 | 98,228 | 33,227 | 5,1420 | 110,01 | 34,411 |
| 26,5 | 4,5311 | 100,49 | 33,313 | 5,1489 | 112,58 | 34,509 |
| 27,0 | 4,5372 | 102,76 | 33,398 | 5,1556 | 115,16 | 34,605 |
| 27,5 | 4,5431 | 105,03 | 33,482 | 5,1621 | 117,74 | 34,701 |
| 28,0 | 4,5489 | 107,30 | 33,563 | 5,1685 | 120,32 | 34,793 |
| 28,5 | 4,5544 | 109,58 | 33,644 | 5,1745 | 122,91 | 34,885 |
| 29,0 | 4,5598 | 111,85 | 33,723 | 5,1804 | 125,49 | 34,975 |
| 29,5 | 4,5651 | 114,14 | 33,801 | 5,1861 | 128,09 | 35,064 |
| 30,0 | 4,5702 | 116,42 | 33,878 | 5,1917 | 130,68 | 35,150 |
| 30,5 | 4,5751 | 118,71 | 33,953 | 5,1970 | 133,28 | 35,236 |
| 31,0 | 4,5800 | 121,00 | 34,028 | 5,2023 | 135,88 | 35,321 |
| 31,5 | 4,5847 | 123,29 | 34,101 | 5,2074 | 138,48 | 35,404 |
| 32,0 | 4,5892 | 125,58 | 34,174 | 5,2123 | 141,08 | 35,486 |
| 32,5 | 4,5937 | 127,88 | 34,245 | 5,2172 | 143,70 | 35,567 |
| 33,0 | 4,5980 | 130,18 | 34,315 | 5,2219 | 146,31 | 35,647 |
| 33,5 | 4,6022 | 132,47 | 34,384 | 5,2264 | 148,91 | 35,726 |
| 34,0 | 4,6063 | 134,77 | 34,452 | 5,2309 | 151,53 | 35,803 |
| 34,5 | 4,6103 | 137,08 | 34,519 | 5,2353 | 154,15 | 35,879 |
| 35,0 | 4,6142 | 139,39 | 34,586 | 5,2395 | 156,77 | 35,955 |
| 35,5 | 4,6179 | 141,69 | 34,651 | 5,2437 | 159,38 | 36,029 |
| 36,0 | 4,6216 | 144,01 | 34,716 | 5,2478 | 162,01 | 36,102 |
| 36,5 | 4,6252 | 146,32 | 34,780 | 5,2518 | 164,64 | 36,175 |
| 37,0 | 4,6287 | 148,63 | 34,843 | 5,2557 | 167,26 | 36,247 |
| 37,5 | 4,6321 | 150,94 | 34,904 | 5,2596 | 169,89 | 36,317 |
| 38,0 | 4,6355 | 153,26 | 34,966 | 5,2634 | 172,52 | 36,387 |
| 38,5 | 4,6387 | 155,58 | 35,027 | 5,2671 | 175,16 | 36,455 |
| 39,0 | 4,6418 | 157,90 | 35,087 | 5,2708 | 177,79 | 36,524 |
| 39,5 | 4,6449 | 160,22 | 35,146 | 5,2745 | 180,42 | 36,591 |
| 40,0 | 4,6480 | 162,55 | 35,204 | 5,2780 | 183,06 | 36,657 |
| 40,5 | 4,6510 | 164,87 | 35,262 | 5,2816 | 185,70 | 36,722 |
| 41,0 | 4,6538 | 167,19 | 35,319 | 5,2850 | 188,34 | 36,787 |
| 41,5 | 4,6567 | 169,52 | 35,376 | 5,2884 | 190,98 | 36,852 |

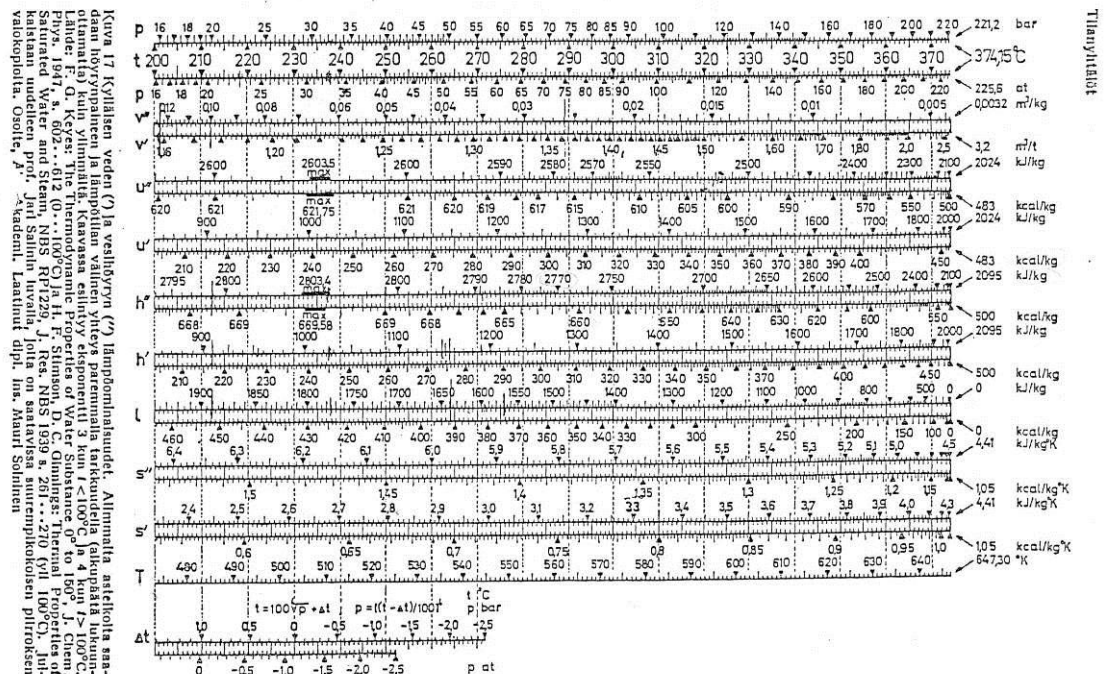
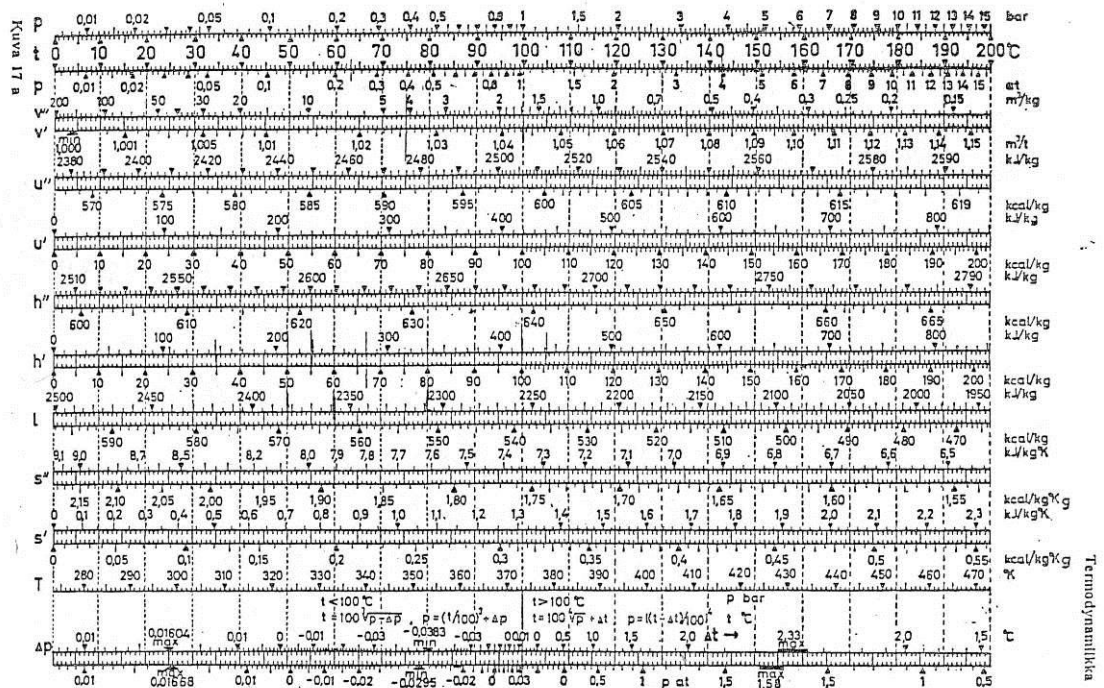
(Raiko 2013.)

LIITE 8: VESIHÖYRYN ENTALPIA-ENTROPIA DIAGRAMMI



(Raiko & Saarenpää 2009.)

LIITE 9: KYLLÄISEN VEDEN JA VESIHÖYRYN OMINAISUUKSIA



(Raiko & Saarenpää 2009.)

LIITE 10A: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (PIENKOKO- PUU JA RANKA) 10.–12.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 10.03.2014 13:36 | 17580 | 53,2 | 41,6 | 47,6 | 39,5 | 44,5 |
| 10.03.2014 13:38 | | 36,7 | | | | |
| 10.03.2014 13:39 | | 38,8 | | | | |
| 10.03.2014 13:41 | | 34,5 | | | | |
| 10.03.2014 13:50 | | 46,7 | | | | |
| 10.03.2014 13:52 | | 39,8 | | | | |
| 10.03.2014 14:10 | 21520 | 35,2 | 42,0 | 47,3 | 50,6 | 35,6 |
| 10.03.2014 14:13 | | 48,8 | | | | |
| 10.03.2014 14:15 | | 38,5 | | | | |
| 10.03.2014 14:19 | | 51,6 | | | | |
| 10.03.2014 14:31 | | 36,3 | | | | |
| 10.03.2014 14:35 | | 41,8 | | | | |
| 10.03.2014 16:18 | 22700 | 42,7 | 39,2 | 41,9 | 39,5 | 41,3 |
| 10.03.2014 16:22 | | 41,5 | | | | |
| 10.03.2014 16:25 | | 41,3 | | | | |
| 10.03.2014 16:27 | | 36 | | | | |
| 10.03.2014 16:29 | | 38,6 | | | | |
| 10.03.2014 16:31 | | 34,9 | | | | |
| 10.03.2014 18:01 | 21840 | 19,2 | 34,7 | 39,8 | 39,5 | 35,6 |
| 10.03.2014 18:04 | | 26,5 | | | | |
| 10.03.2014 18:14 | | 42,3 | | | | |
| 10.03.2014 18:20 | | 40,3 | | | | |
| 10.03.2014 18:25 | | 40,9 | | | | |
| 10.03.2014 18:26 | | 38,9 | | | | |
| 11.03.2014 10:44 | 27240 | 45,3 | 46,0 | 42,7 | 39,5 | 46,3 |
| 11.03.2014 11:00 | | 45,7 | | | | |
| 11.03.2014 11:01 | | 46,8 | | | | |
| 11.03.2014 11:04 | | 45,4 | | | | |
| 11.03.2014 11:06 | | 49,6 | | | | |
| 11.03.2014 11:07 | | 43,3 | | | | |
| 11.03.2014 16:04 | 27180 | 46,3 | 44,1 | 43,6 | 39,5 | 37,1 |
| 11.03.2014 16:06 | | 42,3 | | | | |
| 11.03.2014 16:15 | | 43,9 | | | | |
| 11.03.2014 16:18 | | 45,7 | | | | |
| 11.03.2014 16:23 | | 44,1 | | | | |
| 11.03.2014 16:24 | | 42,2 | | | | |
| 12.03.2014 9:31 | 24060 | 61,7 | 54,4 | 56,9 | 52,6 | 60,9 |
| 12.03.2014 9:36 | | 53,7 | | | | |
| 12.03.2014 9:38 | | 49,9 | | | | |
| 12.03.2014 9:39 | | 48,3 | | | | |
| 12.03.2014 9:45 | | 51,2 | | | | |
| 12.03.2014 9:48 | | 61,8 | | | | |
| 12.03.2014 12:35 | 17160 | 29,5 | 25,3 | 25,2 | 52,6 | 38,1 |
| 12.03.2014 12:37 | | 25,9 | | | | |
| 12.03.2014 12:39 | | 27,4 | | | | |
| 12.03.2014 12:41 | | 22,4 | | | | |
| 12.03.2014 12:45 | | 22 | | | | |
| 12.03.2014 12:47 | | 24,6 | | | | |
| 12.03.2014 13:58 | 19440 | 29,3 | 34,6 | 39,9 | 52,6 | 35,3 |
| 12.03.2014 14:01 | | 37,5 | | | | |
| 12.03.2014 14:09 | | 31,6 | | | | |
| 12.03.2014 14:13 | | 36 | | | | |
| 12.03.2014 14:17 | | 38,6 | | | | |

LIITE 10B: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (KANTO)

10.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 10.03.2014 6:37 | 22240 | 37,7 | 38,9 | 39,8 | 28,3 | 38,5 |
| 10.03.2014 6:40 | | 41,5 | | | | |
| 10.03.2014 6:46 | | 35,3 | | | | |
| 10.03.2014 6:52 | | 39 | | | | |
| 10.03.2014 6:59 | | 39,2 | | | | |
| 10.03.2014 7:06 | | 40,9 | | | | |
| 10.03.2014 7:30 | 18020 | 32,9 | 38,4 | 38,3 | 28,3 | 35,3 |
| 10.03.2014 7:45 | | 38,5 | | | | |
| 10.03.2014 7:47 | | 38,6 | | | | |
| 10.03.2014 7:48 | | 41,3 | | | | |
| 10.03.2014 7:50 | | 35,7 | | | | |
| 10.03.2014 7:56 | | 43,5 | | | | |
| 10.03.2014 9:26 | 15400 | 31 | 31,8 | 30,2 | 28,3 | 35,1 |
| 10.03.2014 9:27 | | 36,6 | | | | |
| 10.03.2014 9:30 | | 34,5 | | | | |
| 10.03.2014 9:40 | | 31,7 | | | | |
| 10.03.2014 9:42 | | 23,2 | | | | |
| 10.03.2014 9:44 | | 34 | | | | |
| 10.03.2014 10:41 | 19640 | 38,8 | 35,5 | 34,0 | 28,3 | 37,0 |
| 10.03.2014 10:45 | | 30,1 | | | | |
| 10.03.2014 10:48 | | 37,4 | | | | |
| 10.03.2014 11:29 | | 38,1 | | | | |
| 10.03.2014 11:33 | | 34,1 | | | | |
| 10.03.2014 11:35 | | 34,4 | | | | |
| 10.03.2014 11:42 | 14080 | 24,6 | 25,5 | 24,9 | 28,3 | 26,8 |
| 10.03.2014 11:44 | | 25,9 | | | | |
| 10.03.2014 11:46 | | 26,9 | | | | |
| 10.03.2014 11:49 | | 21,1 | | | | |
| 10.03.2014 11:57 | | 25,9 | | | | |
| 10.03.2014 12:00 | | 28,4 | | | | |
| 10.03.2014 12:54 | 17020 | 33,9 | 29,8 | 30,0 | 28,3 | 27,6 |
| 10.03.2014 13:02 | | 25,6 | | | | |
| 10.03.2014 13:03 | | 24,8 | | | | |
| 10.03.2014 13:06 | | 27,7 | | | | |
| 10.03.2014 13:08 | | 32,1 | | | | |
| 10.03.2014 13:33 | | 34,9 | | | | |
| 10.03.2014 17:07 | 15620 | 27,7 | 23,9 | 24,0 | 28,3 | 35,5 |
| 10.03.2014 17:09 | | 23,1 | | | | |
| 10.03.2014 17:14 | | 21,9 | | | | |
| 10.03.2014 17:16 | | 24,2 | | | | |
| 10.03.2014 17:23 | | 24,2 | | | | |
| 10.03.2014 17:24 | | 22,1 | | | | |
| 10.03.2014 19:27 | 17420 | 28,5 | 28,7 | 28,3 | 28,3 | 32,1 |
| 10.03.2014 19:30 | | 33,5 | | | | |
| 10.03.2014 19:32 | | 23,9 | | | | |
| 10.03.2014 19:34 | | 31,9 | | | | |
| 10.03.2014 19:38 | | 27,4 | | | | |
| 10.03.2014 19:42 | | 26,7 | | | | |

LIITE 10C: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (KANTO)

11.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 11.03.2014 8:54 | 19120 | 36,8 | 34,9 | 33,7 | 30,4 | 44,4 |
| 11.03.2014 8:58 | | 33,8 | | | | |
| 11.03.2014 9:01 | | 36,5 | | | | |
| 11.03.2014 9:05 | | 36,8 | | | | |
| 11.03.2014 9:20 | | 31,8 | | | | |
| 11.03.2014 9:22 | | 33,8 | | | | |
| 11.03.2014 10:36 | 14320 | 27,3 | 26,7 | 26,3 | 30,4 | 30,6 |
| 11.03.2014 10:41 | | 23,7 | | | | |
| 11.03.2014 10:46 | | 29,8 | | | | |
| 11.03.2014 10:47 | | 30,3 | | | | |
| 11.03.2014 10:49 | | 23,7 | | | | |
| 11.03.2014 10:51 | | 25,2 | | | | |
| 11.03.2014 11:37 | 20660 | 34,5 | 38,2 | 33,9 | 30,4 | 49,7 |
| 11.03.2014 11:40 | | 38,9 | | | | |
| 11.03.2014 11:42 | | 35,7 | | | | |
| 11.03.2014 11:47 | | 42,6 | | | | |
| 11.03.2014 11:49 | | 38 | | | | |
| 11.03.2014 11:52 | | 39,5 | | | | |
| 11.03.2014 12:58 | 16440 | 33,8 | 29,3 | 29,0 | 30,4 | 32,0 |
| 11.03.2014 13:00 | | 31,8 | | | | |
| 11.03.2014 13:03 | | 26,1 | | | | |
| 11.03.2014 13:05 | | 30,8 | | | | |
| 11.03.2014 13:09 | | 30,5 | | | | |
| 11.03.2014 13:11 | | 22,5 | | | | |
| 11.03.2014 14:38 | 17940 | 34 | 32,8 | 31,5 | 30,4 | 42,1 |
| 11.03.2014 14:43 | | 33,6 | | | | |
| 11.03.2014 14:45 | | 28,4 | | | | |
| 11.03.2014 14:56 | | 26,4 | | | | |
| 11.03.2014 14:59 | | 43,6 | | | | |
| 11.03.2014 15:02 | | 31 | | | | |
| 11.03.2014 18:09 | 20240 | 41,2 | 38,2 | 38,5 | 30,4 | 44,3 |
| 11.03.2014 18:12 | | 49,2 | | | | |
| 11.03.2014 18:18 | | 38,5 | | | | |
| 11.03.2014 18:24 | | 30,6 | | | | |
| 11.03.2014 18:27 | | 33,2 | | | | |
| 11.03.2014 18:33 | | 36,5 | | | | |
| 11.03.2014 18:47 | 24600 | 32,6 | 35,9 | 34,9 | 30,4 | 38,8 |
| 11.03.2014 18:50 | | 41,8 | | | | |
| 11.03.2014 18:54 | | 37,3 | | | | |
| 11.03.2014 18:56 | | 35,1 | | | | |
| 11.03.2014 19:10 | | 37,6 | | | | |
| 11.03.2014 19:20 | | 30,7 | | | | |

LIITE 10D: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (KANTO)

12.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 12.03.2014 6:14 | 20960 | 30,9 | 28,2 | 28,5 | 31,0 | 28,1 |
| 12.03.2014 6:21 | | 24,7 | | | | |
| 12.03.2014 6:24 | | 28,1 | | | | |
| 12.03.2014 6:28 | | 27 | | | | |
| 12.03.2014 6:30 | | 27 | | | | |
| 12.03.2014 6:44 | | 31,6 | | | | |
| 12.03.2014 8:12 | 20480 | 36,8 | 40,7 | 39,5 | 31,0 | 51,5 |
| 12.03.2014 8:14 | | 44,1 | | | | |
| 12.03.2014 8:19 | | 37,7 | | | | |
| 12.03.2014 8:21 | | 36,7 | | | | |
| 12.03.2014 8:24 | | 47,2 | | | | |
| 12.03.2014 8:27 | | 41,9 | | | | |
| 12.03.2014 8:33 | 15160 | 34 | 26,1 | 22,4 | 31,0 | 29,1 |
| 12.03.2014 8:36 | | 27,8 | | | | |
| 12.03.2014 8:42 | | 24,6 | | | | |
| 12.03.2014 8:48 | | 24,1 | | | | |
| 12.03.2014 8:53 | | 20,9 | | | | |
| 12.03.2014 8:59 | | 25,2 | | | | |
| 12.03.2014 10:01 | 21040 | 36 | 35,2 | 35,5 | 31,0 | 49,4 |
| 12.03.2014 10:05 | | 39 | | | | |
| 12.03.2014 10:07 | | 36,3 | | | | |
| 12.03.2014 10:15 | | 36,5 | | | | |
| 12.03.2014 10:17 | | 36,5 | | | | |
| 12.03.2014 10:20 | | 26,9 | | | | |
| 12.03.2014 10:40 | 23140 | 32,4 | 34,0 | 33,7 | 31,0 | 38,1 |
| 12.03.2014 10:42 | | 34 | | | | |
| 12.03.2014 10:44 | | 38,6 | | | | |
| 12.03.2014 10:48 | | 32,6 | | | | |
| 12.03.2014 11:00 | | 29,3 | | | | |
| 12.03.2014 11:05 | | 37,2 | | | | |
| 12.03.2014 11:28 | 19160 | 27,5 | 34,8 | 34,7 | 31,0 | 35,4 |
| 12.03.2014 11:30 | | 46,5 | | | | |
| 12.03.2014 11:34 | | 27,8 | | | | |
| 12.03.2014 11:40 | | 37,2 | | | | |
| 12.03.2014 11:43 | | 38,9 | | | | |
| 12.03.2014 11:47 | | 30,6 | | | | |
| 12.03.2014 13:17 | 19620 | 21,4 | 28,7 | 29,8 | 31,0 | 37,8 |
| 12.03.2014 13:18 | | 27,6 | | | | |
| 12.03.2014 13:20 | | 30,1 | | | | |
| 12.03.2014 13:27 | | 28,7 | | | | |
| 12.03.2014 13:34 | | 32,7 | | | | |
| 12.03.2014 13:36 | | 31,6 | | | | |

LIITE 10E: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (METSÄHAK- KUUTÄHDE) 10.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 10.03.2014 8:32 | 22320 | 25,2 | 34,7 | 42,2 | 35,0 | 52,0 |
| 10.03.2014 8:36 | | 40,6 | | | | |
| 10.03.2014 8:39 | | 18,8 | | | | |
| 10.03.2014 8:42 | | 57,9 | | | | |
| 10.03.2014 9:03 | | 33,1 | | | | |
| 10.03.2014 9:09 | | 32,6 | | | | |
| 10.03.2014 9:57 | 18600 | 47,4 | 45,5 | 48,4 | 35,0 | 38,9 |
| 10.03.2014 10:00 | | 42 | | | | |
| 10.03.2014 10:08 | | 38 | | | | |
| 10.03.2014 10:16 | | 63,2 | | | | |
| 10.03.2014 10:19 | | 45,5 | | | | |
| 10.03.2014 10:23 | | 36,7 | | | | |
| 10.03.2014 15:35 | 21220 | 72,6 | 60,1 | 59,0 | 35,0 | 30,0 |
| 10.03.2014 15:37 | | 64,2 | | | | |
| 10.03.2014 15:39 | | 57,3 | | | | |
| 10.03.2014 15:46 | | 44,2 | | | | |
| 10.03.2014 15:51 | | 60,1 | | | | |
| 10.03.2014 15:56 | | 62,4 | | | | |

LIITE 10F: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (METSÄHAK- KUUTÄHDE) 11.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 11.03.2014 6:07 | 24500 | 52,6 | 62,7 | 61,9 | 62,3 | 48,0 |
| 11.03.2014 6:15 | | 63,6 | | | | |
| 11.03.2014 6:18 | | 64,7 | | | | |
| 11.03.2014 6:22 | | 74 | | | | |
| 11.03.2014 6:29 | | 65,3 | | | | |
| 11.03.2014 6:31 | | 56,1 | | | | |
| 11.03.2014 6:53 | 27200 | 79,9 | 77,5 | 74,9 | 62,3 | 78,6 |
| 11.03.2014 6:58 | | 80,4 | | | | |
| 11.03.2014 7:05 | | 81,3 | | | | |
| 11.03.2014 7:09 | | 74,9 | | | | |
| 11.03.2014 7:14 | | 76 | | | | |
| 11.03.2014 7:23 | | 72,5 | | | | |
| 11.03.2014 7:40 | 24500 | 66,9 | 64,4 | 63,6 | 56,8 | 61,8 |
| 11.03.2014 7:44 | | 65 | | | | |
| 11.03.2014 7:54 | | 64,5 | | | | |
| 11.03.2014 7:56 | | 60,2 | | | | |
| 11.03.2014 8:00 | | 68,4 | | | | |
| 11.03.2014 8:06 | | 61,2 | | | | |
| 11.03.2014 8:24 | 20400 | 46,2 | 29,1 | 35,6 | 56,8 | 54,9 |
| 11.03.2014 8:26 | | 32 | | | | |
| 11.03.2014 8:30 | | 30,5 | | | | |
| 11.03.2014 8:32 | | 19,6 | | | | |
| 11.03.2014 8:34 | | 22,9 | | | | |
| 11.03.2014 8:39 | | 23,1 | | | | |
| 11.03.2014 12:09 | 21860 | 55,9 | 50,1 | 48,7 | 56,8 | 44,3 |
| 11.03.2014 12:20 | | 61,9 | | | | |
| 11.03.2014 12:33 | | 51 | | | | |
| 11.03.2014 12:37 | | 41,1 | | | | |
| 11.03.2014 12:52 | | 41,4 | | | | |
| 11.03.2014 12:54 | | 49,5 | | | | |
| 11.03.2014 15:25 | 20640 | 77,2 | 49,5 | 47,5 | 56,8 | 44,8 |
| 11.03.2014 15:28 | | 44,2 | | | | |
| 11.03.2014 15:34 | | 49,8 | | | | |
| 11.03.2014 15:37 | | 28,2 | | | | |
| 11.03.2014 15:42 | | 49,8 | | | | |
| 11.03.2014 15:45 | | 47,5 | | | | |
| 11.03.2014 17:07 | 24800 | 44,6 | 53,2 | 55,6 | 55,0 | 34,6 |
| 11.03.2014 17:12 | | 50,2 | | | | |
| 11.03.2014 17:16 | | 62,2 | | | | |
| 11.03.2014 17:24 | | 46,8 | | | | |
| 11.03.2014 17:31 | | 58,8 | | | | |
| 11.03.2014 17:47 | | 56,3 | | | | |

LIITE 10G: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (METSÄHAK- KUUTÄHDE) 12.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% | Röntgen-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|-----------|
| 12.03.2014 7:25 | 25380 | 69,7 | 73,9 | 70,7 | 78,7 | 79,5 |
| 12.03.2014 7:32 | | 75,5 | | | | |
| 12.03.2014 7:40 | | 74,8 | | | | |
| 12.03.2014 7:49 | | 77,2 | | | | |
| 12.03.2014 7:57 | | 73 | | | | |
| 12.03.2014 8:05 | | 73,1 | | | | |
| 12.03.2014 14:36 | 23880 | 54 | 56,0 | 59,6 | 60,9 | 30,8 |
| 12.03.2014 14:43 | | 67,3 | | | | |
| 12.03.2014 14:47 | | 59,5 | | | | |
| 12.03.2014 14:51 | | 62,1 | | | | |
| 12.03.2014 14:56 | | 50 | | | | |
| 12.03.2014 14:58 | | 43,1 | | | | |
| 12.03.2014 15:02 | | 61,1 | | | | |
| 12.03.2014 15:41 | 28740 | 70,5 | 70,8 | 69,0 | 60,9 | 51,7 |
| 12.03.2014 15:46 | | 69,7 | | | | |
| 12.03.2014 15:52 | | 74,1 | | | | |
| 12.03.2014 15:58 | | 74,1 | | | | |
| 12.03.2014 16:03 | | 74,4 | | | | |
| 12.03.2014 16:05 | | 62 | | | | |
| 12.03.2014 16:16 | 17500 | 56 | 56,2 | 55,8 | 60,9 | 30,0 |
| 12.03.2014 16:18 | | 59,5 | | | | |
| 12.03.2014 16:28 | | 52,1 | | | | |
| 12.03.2014 16:29 | | 54,9 | | | | |
| 12.03.2014 16:47 | | 55,7 | | | | |
| 12.03.2014 16:48 | | 58,7 | | | | |

LIITE 10H: MITTAUSPÖYTÄKIRJA (TURVE) 10.– 12.3.2014

| Päiväys | Nettopaino (kg) | BMA-% | BMA,kesk.-% | Uuni-% | Kuski-% |
|------------------|-----------------|-------|-------------|--------|---------|
| 10.03.2014 7:22 | 40900 | 37,3 | 34,8 | 33,6 | 32,4 |
| 10.03.2014 7:25 | | 34,2 | | | |
| 10.03.2014 7:37 | | 33,4 | | | |
| 10.03.2014 7:39 | | 36,2 | | | |
| 10.03.2014 7:41 | | 33,2 | | | |
| 10.03.2014 7:43 | | 34,5 | | | |
| 10.03.2014 9:21 | 43980 | 36,6 | 35,2 | 40,8 | 34,0 |
| 10.03.2014 9:23 | | 35,1 | | | |
| 10.03.2014 9:32 | | 39,3 | | | |
| 10.03.2014 9:34 | | 34,9 | | | |
| 10.03.2014 9:36 | | 33,9 | | | |
| 10.03.2014 9:38 | | 31,5 | | | |
| 10.03.2014 12:34 | 42020 | 35,8 | 35,7 | 33,8 | 37,6 |
| 10.03.2014 12:40 | | 36,1 | | | |
| 10.03.2014 12:43 | | 36,4 | | | |
| 10.03.2014 12:44 | | 33,3 | | | |
| 10.03.2014 12:46 | | 35 | | | |
| 10.03.2014 12:48 | | 37,3 | | | |
| 10.03.2014 13:02 | 44680 | 34,0 | 34,0 | 34,0 | 34,0 |
| 11.03.2014 11:22 | 45540 | 30 | 38,0 | 40,5 | 37,5 |
| 11.03.2014 11:23 | | 30,9 | | | |
| 11.03.2014 11:25 | | 51,1 | | | |
| 11.03.2014 11:27 | | 34,8 | | | |
| 11.03.2014 11:28 | | 36 | | | |
| 11.03.2014 11:30 | | 45,3 | | | |
| 11.03.2014 16:35 | 41680 | 39,8 | 40,5 | 38,6 | 38,0 |
| 11.03.2014 16:37 | | 39,4 | | | |
| 11.03.2014 16:38 | | 42,5 | | | |
| 11.03.2014 16:39 | | 40,1 | | | |
| 11.03.2014 16:41 | | 39,9 | | | |
| 11.03.2014 16:43 | | 41,5 | | | |
| 11.03.2014 18:48 | 42340 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 |
| 12.03.2014 16:10 | 42200 | 39,9 | 39,9 | 37,9 | 36,7 |
| 12.03.2014 9:04 | 42700 | 53,7 | 48,1 | 49,7 | 47,3 |
| 12.03.2014 9:07 | | 52,7 | | | |
| 12.03.2014 9:10 | | 45,3 | | | |
| 12.03.2014 9:13 | | 45,5 | | | |
| 12.03.2014 9:17 | | 46,3 | | | |
| 12.03.2014 9:20 | | 45 | | | |
| 12.03.2014 12:53 | 41620 | 44,6 | 41,3 | 37,4 | 37,7 |
| 12.03.2014 12:55 | | 41,3 | | | |
| 12.03.2014 12:56 | | 41 | | | |
| 12.03.2014 12:58 | | 43,3 | | | |
| 12.03.2014 12:59 | | 40,2 | | | |
| 12.03.2014 13:00 | | 37,2 | | | |
| 12.03.2014 16:54 | 41980 | 42,5 | 42,8 | 39,7 | 39,8 |
| 12.03.2014 16:56 | | 42 | | | |
| 12.03.2014 17:06 | | 43,7 | | | |
| 12.03.2014 17:07 | | 42,5 | | | |
| 12.03.2014 17:08 | | 43,4 | | | |
| 12.03.2014 17:09 | | 42,8 | | | |
| 12.03.2014 18:16 | 42700 | 37,8 | 37,8 | 37,8 | 37,8 |
| 13.03.2014 4:11 | 43720 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 |
| 13.03.2014 6:31 | 42420 | 40,6 | 40,6 | 40,6 | 40,6 |
| 13.03.2014 9:12 | 43360 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 |
| 13.03.2014 14:53 | 43500 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 |
| 13.03.2014 15:34 | 40520 | 40,6 | 40,6 | 40,6 | 40,6 |

LIITE 11: METSÄPOLTTOAINEKUORMIEN TE- HOLLISET LÄMPÖARVOT SAAPUMISKOSTEU- DESSA

| Pienkokopuu | | | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|-------|-------|---------|---------------|
| PVM | Qnet,d (MJ/kg) | Qnet,ar (MJ/kg) | | | | |
| | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen | Röntgen, tod. |
| 10.3.2014 13:36 | 18,36 | 9,70 | 8,45 | 10,14 | 9,10 | 9,01 |
| 10.3.2014 14:10 | 18,36 | 9,62 | 8,52 | 7,83 | 10,95 | 10,94 |
| 10.3.2014 16:18 | 18,36 | 10,21 | 9,65 | 10,14 | 9,77 | 9,72 |
| 10.3.2014 18:01 | 18,36 | 11,15 | 10,07 | 10,14 | 10,96 | 10,94 |
| 11.3.2014 10:44 | 18,36 | 8,79 | 9,47 | 10,14 | 8,73 | 8,70 |
| 11.3.2014 16:04 | 18,36 | 9,19 | 9,29 | 10,14 | 10,65 | 10,60 |
| 12.3.2014 9:31 | 18,36 | 7,04 | 6,52 | 7,42 | 5,69 | 5,67 |
| 12.3.2014 12:35 | 18,36 | 13,10 | 13,11 | 7,42 | 10,44 | 10,42 |
| 12.3.2014 13:58 | 18,36 | 11,16 | 10,07 | 7,42 | 11,01 | 10,95 |
| Kanto | | | | | | |
| PVM | Qnet,d (MJ/kg) | Qnet,ar (MJ/kg) | | | | |
| | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen | Röntgen, tod. |
| 10.3.2014 6:37 | 18,36 | 10,26 | 10,08 | 12,47 | 10,34 | 9,23 |
| 10.3.2014 7:30 | 18,36 | 10,37 | 10,40 | 12,47 | 11,01 | 10,53 |
| 10.3.2014 9:26 | 18,36 | 11,74 | 12,08 | 12,47 | 11,06 | 10,66 |
| 10.3.2014 10:41 | 18,36 | 10,98 | 11,29 | 12,47 | 10,66 | 10,31 |
| 10.3.2014 11:42 | 18,36 | 13,06 | 13,18 | 12,47 | 12,79 | 12,48 |
| 10.3.2014 12:54 | 18,36 | 12,15 | 12,12 | 12,47 | 12,62 | 12,40 |
| 10.3.2014 17:07 | 18,36 | 13,40 | 13,38 | 12,47 | 10,97 | 10,77 |
| 10.3.2014 19:27 | 18,36 | 12,40 | 12,48 | 12,47 | 11,69 | 11,49 |
| 11.3.2014 8:54 | 18,36 | 11,10 | 11,35 | 12,04 | 9,12 | 8,83 |
| 11.3.2014 10:36 | 18,36 | 12,81 | 12,89 | 12,04 | 11,99 | 11,78 |
| 11.3.2014 11:37 | 18,36 | 10,41 | 11,31 | 12,04 | 8,03 | 7,47 |
| 11.3.2014 12:58 | 18,36 | 12,28 | 12,32 | 12,04 | 11,70 | 11,46 |
| 11.3.2014 14:38 | 18,36 | 11,53 | 11,81 | 12,04 | 9,61 | 9,34 |
| 11.3.2014 18:09 | 18,36 | 10,41 | 10,34 | 12,04 | 9,15 | 8,84 |
| 11.3.2014 18:47 | 18,36 | 10,90 | 11,10 | 12,04 | 10,29 | 9,85 |
| 12.3.2014 6:14 | 18,36 | 12,49 | 12,43 | 11,91 | 12,50 | 12,13 |
| 12.3.2014 8:12 | 18,36 | 9,89 | 10,15 | 11,91 | 7,66 | 7,06 |
| 12.3.2014 8:33 | 18,36 | 12,93 | 13,70 | 11,91 | 12,30 | 11,92 |
| 12.3.2014 10:01 | 18,36 | 11,04 | 10,98 | 11,91 | 8,09 | 7,85 |
| 12.3.2014 10:40 | 18,36 | 11,28 | 11,35 | 11,91 | 10,44 | 10,18 |
| 12.3.2014 11:28 | 18,36 | 11,13 | 11,14 | 11,91 | 11,00 | 10,80 |
| 12.3.2014 13:17 | 18,36 | 12,39 | 12,16 | 11,91 | 10,49 | 10,26 |
| Metsähakkuutähde | | | | | | |
| PVM | Qnet,d (MJ/kg) | Qnet,ar (MJ/kg) | | | | |
| | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen | Röntgen, tod. |
| 10.3.2014 8:32 | 18,00 | 10,91 | 9,38 | 10,85 | 7,37 | 7,16 |
| 10.3.2014 9:57 | 18,00 | 8,71 | 8,11 | 10,85 | 10,04 | 9,95 |
| 10.3.2014 15:35 | 18,00 | 5,71 | 5,94 | 10,85 | 11,87 | 11,55 |
| 11.3.2014 6:07 | 18,00 | 5,18 | 5,35 | 5,27 | 8,18 | 8,02 |
| 11.3.2014 6:53 | 18,00 | 2,16 | 2,70 | 5,27 | 1,92 | 1,91 |
| 11.3.2014 7:40 | 18,00 | 4,84 | 4,99 | 6,39 | 5,37 | 5,34 |
| 11.3.2014 8:24 | 18,00 | 12,06 | 10,73 | 6,39 | 6,79 | 6,52 |
| 11.3.2014 12:09 | 18,00 | 7,75 | 8,05 | 6,39 | 8,95 | 8,89 |
| 11.3.2014 15:25 | 18,00 | 7,89 | 8,28 | 6,39 | 8,85 | 8,72 |
| 11.3.2014 17:07 | 18,00 | 7,14 | 6,63 | 6,76 | 10,93 | 10,84 |
| 12.3.2014 7:25 | 18,00 | 2,90 | 3,55 | 1,91 | 1,75 | 1,74 |
| 12.3.2014 14:36 | 18,00 | 6,55 | 5,82 | 5,55 | 11,70 | 11,68 |
| 12.3.2014 15:41 | 18,00 | 3,53 | 3,90 | 5,55 | 7,44 | 7,39 |
| 12.3.2014 16:16 | 18,00 | 6,52 | 6,60 | 5,55 | 11,86 | 11,82 |

LIITE 12: TURVEKUORMIEN TEHOLLISET LÄMPÖÄRVOT SAAPUMISKOSTEUESSA

| Turve | | | | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------|-------|---------|---------------|
| PVM | Qnet,d (MJ/kg) | Qnet,ar (MJ/kg) | | | | |
| | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen | Röntgen, tod. |
| 10.3.2014 7:22 | 24,00 | 14,80 | 15,12 | 15,43 | 168,13 | 171,81 |
| 10.3.2014 9:21 | 22,90 | 13,98 | 12,55 | 14,28 | 170,74 | 153,31 |
| 10.3.2014 12:34 | 23,50 | 14,25 | 14,74 | 13,75 | 166,35 | 171,99 |
| 10.3.2014 13:02 | 22,90 | 14,28 | 14,28 | 14,28 | 177,28 | 177,28 |
| 11.3.2014 11:22 | 22,90 | 13,27 | 12,64 | 13,40 | 167,82 | 159,95 |
| 11.3.2014 16:35 | 24,00 | 13,28 | 13,78 | 13,95 | 153,78 | 159,58 |
| 11.3.2014 18:48 | 22,90 | 13,40 | 13,40 | 13,40 | 157,57 | 157,57 |
| 12.3.2014 16:10 | 23,50 | 13,15 | 13,68 | 13,98 | 154,14 | 160,31 |
| 12.3.2014 9:04 | 22,60 | 10,56 | 10,16 | 10,76 | 125,25 | 120,46 |
| 12.3.2014 12:53 | 24,00 | 13,09 | 14,12 | 14,03 | 151,32 | 163,28 |
| 12.3.2014 16:54 | 23,50 | 12,39 | 13,21 | 13,18 | 144,52 | 154,00 |
| 12.3.2014 18:16 | 22,90 | 13,32 | 13,32 | 13,32 | 158,00 | 158,00 |
| 13.3.2014 4:11 | 23,50 | 12,60 | 12,60 | 12,60 | 153,08 | 153,08 |
| 13.3.2014 6:31 | 24,00 | 13,26 | 13,26 | 13,26 | 156,31 | 156,31 |
| 13.3.2014 9:12 | 23,50 | 12,60 | 12,60 | 12,60 | 151,82 | 151,82 |
| 13.3.2014 14:53 | 23,50 | 12,60 | 12,60 | 12,60 | 152,31 | 152,31 |
| 13.3.2014 15:34 | 24,00 | 13,26 | 13,26 | 13,26 | 149,30 | 149,30 |

LIITE 13. KATTILAN SAVUKAASUPUOLELLE SI- SÄÄN MENEVÄT LÄMPÖTEHOT MITTAUSTEN AIKANA

| PVM | Klo | Polttoaineiden teho | | | | Palamisilma | Kokonaisteho | | | |
|------------|-------|---------------------|--------|--------|---------|-------------|--------------|--------|--------|---------|
| | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen |
| | | MW | MW | MW | MW | | MW | MW | MW | MW |
| 10.03.2014 | 14-15 | 92,47 | 92,66 | 93,53 | 92,44 | 3,85 | 96,32 | 96,51 | 97,38 | 96,29 |
| 10.03.2014 | 15-16 | 102,98 | 103,20 | 104,18 | 102,95 | 4,36 | 107,34 | 107,55 | 108,54 | 107,30 |
| 10.03.2014 | 16-17 | 110,51 | 110,74 | 111,80 | 110,47 | 4,57 | 115,08 | 115,31 | 116,37 | 115,04 |
| 10.03.2014 | 17-18 | 102,49 | 102,70 | 103,68 | 102,45 | 4,37 | 106,86 | 107,07 | 108,05 | 106,82 |
| 10.03.2014 | 18-19 | 81,99 | 82,16 | 82,95 | 81,96 | 4,39 | 86,38 | 86,55 | 87,33 | 86,35 |
| 10.03.2014 | 19-20 | 78,26 | 78,43 | 79,18 | 78,24 | 4,53 | 82,79 | 82,95 | 83,70 | 82,76 |
| 10.03.2014 | 20-21 | 94,23 | 94,43 | 95,33 | 94,20 | 4,26 | 98,49 | 98,69 | 99,59 | 98,46 |
| 10.03.2014 | 21-22 | 97,87 | 98,07 | 99,01 | 97,84 | 4,64 | 102,51 | 102,71 | 103,65 | 102,48 |
| 10.03.2014 | 22-23 | 82,39 | 82,56 | 83,35 | 82,36 | 4,55 | 86,94 | 87,11 | 87,90 | 86,91 |
| 10.03.2014 | 23-00 | 100,74 | 100,95 | 101,92 | 100,71 | 4,66 | 105,40 | 105,61 | 106,58 | 105,37 |
| 11.03.2014 | 00-01 | 101,42 | 101,63 | 102,60 | 101,38 | 4,56 | 105,98 | 106,20 | 107,17 | 105,95 |
| 11.03.2014 | 01-02 | 84,36 | 84,54 | 85,35 | 84,33 | 4,43 | 88,79 | 88,97 | 89,78 | 88,76 |
| 11.03.2014 | 02-03 | 80,69 | 80,86 | 81,63 | 80,66 | 3,84 | 84,53 | 84,70 | 85,47 | 84,50 |
| 11.03.2014 | 03-04 | 88,22 | 88,41 | 89,25 | 88,19 | 3,89 | 92,11 | 92,30 | 93,14 | 92,09 |
| 11.03.2014 | 04-05 | 86,89 | 87,07 | 87,90 | 86,86 | 4,40 | 91,29 | 91,47 | 92,30 | 91,26 |
| 11.03.2014 | 05-06 | 99,65 | 99,86 | 100,82 | 99,62 | 4,53 | 104,18 | 104,39 | 105,35 | 104,15 |
| 11.03.2014 | 06-07 | 103,43 | 103,65 | 104,64 | 103,40 | 4,92 | 108,35 | 108,57 | 109,56 | 108,31 |
| 11.03.2014 | 07-08 | 90,42 | 90,61 | 91,48 | 90,39 | 4,94 | 95,36 | 95,55 | 96,42 | 95,33 |
| 11.03.2014 | 08-09 | 100,53 | 100,74 | 101,71 | 100,50 | 4,42 | 104,95 | 105,16 | 106,12 | 104,92 |
| 11.03.2014 | 09-10 | 106,01 | 106,24 | 107,25 | 105,98 | 4,34 | 110,35 | 110,58 | 111,59 | 110,32 |
| 11.03.2014 | 10-11 | 108,82 | 109,05 | 110,09 | 108,78 | 4,43 | 113,25 | 113,48 | 114,52 | 113,22 |
| 11.03.2014 | 11-12 | 106,42 | 106,65 | 107,67 | 106,39 | 4,31 | 110,73 | 110,96 | 111,98 | 110,70 |
| 11.03.2014 | 12-13 | 99,56 | 99,77 | 100,72 | 99,53 | 4,16 | 103,72 | 103,93 | 104,88 | 103,69 |
| 11.03.2014 | 13-14 | 96,18 | 96,38 | 97,30 | 96,14 | 4,30 | 100,48 | 100,68 | 101,60 | 100,45 |
| 11.03.2014 | 14-15 | 71,73 | 71,88 | 72,57 | 71,71 | 4,24 | 75,98 | 76,13 | 76,81 | 75,95 |
| 11.03.2014 | 15-16 | 77,88 | 78,04 | 78,79 | 77,86 | 4,05 | 81,93 | 82,10 | 82,84 | 81,91 |
| 11.03.2014 | 16-17 | 81,39 | 81,56 | 82,34 | 81,36 | 4,25 | 85,64 | 85,81 | 86,59 | 85,61 |
| 11.03.2014 | 17-18 | 89,45 | 89,64 | 90,50 | 89,43 | 4,31 | 93,76 | 93,95 | 94,81 | 93,73 |
| 11.03.2014 | 18-19 | 85,46 | 85,64 | 86,45 | 85,43 | 4,53 | 89,99 | 90,17 | 90,98 | 89,96 |
| 11.03.2014 | 19-20 | 88,26 | 88,44 | 89,29 | 88,23 | 4,47 | 92,73 | 92,92 | 93,76 | 92,70 |
| 11.03.2014 | 20-21 | 90,31 | 90,50 | 91,36 | 90,28 | 4,35 | 94,66 | 94,85 | 95,71 | 94,63 |
| 11.03.2014 | 21-22 | 67,03 | 67,17 | 67,81 | 67,00 | 3,95 | 70,97 | 71,11 | 71,75 | 70,95 |
| 11.03.2014 | 22-23 | 75,66 | 75,81 | 76,54 | 75,63 | 3,96 | 79,62 | 79,78 | 80,50 | 79,59 |
| 11.03.2014 | 23-00 | 76,84 | 77,00 | 77,74 | 76,81 | 4,70 | 81,54 | 81,70 | 82,43 | 81,51 |
| 12.03.2014 | 00-01 | 75,34 | 75,50 | 76,22 | 75,32 | 4,72 | 80,06 | 80,22 | 80,94 | 80,03 |
| 12.03.2014 | 01-02 | 87,84 | 88,03 | 88,87 | 87,81 | 4,68 | 92,53 | 92,71 | 93,55 | 92,50 |
| 12.03.2014 | 02-03 | 105,69 | 105,91 | 106,92 | 105,65 | 5,08 | 110,77 | 110,99 | 112,00 | 110,73 |
| 12.03.2014 | 03-04 | 116,42 | 116,66 | 117,78 | 116,38 | 5,11 | 121,53 | 121,77 | 122,89 | 121,49 |
| 12.03.2014 | 04-05 | 116,68 | 116,92 | 118,04 | 116,64 | 4,99 | 121,67 | 121,91 | 123,03 | 121,63 |
| 12.03.2014 | 05-06 | 100,66 | 100,87 | 101,84 | 100,63 | 4,73 | 105,40 | 105,61 | 106,57 | 105,36 |
| 12.03.2014 | 06-07 | 111,42 | 111,65 | 112,72 | 111,38 | 5,51 | 116,93 | 117,16 | 118,23 | 116,89 |
| 12.03.2014 | 07-08 | 99,31 | 99,52 | 100,47 | 99,28 | 5,65 | 104,96 | 105,17 | 106,12 | 104,92 |
| 12.03.2014 | 08-09 | 111,62 | 111,85 | 112,92 | 111,58 | 5,22 | 116,84 | 117,07 | 118,14 | 116,80 |
| 12.03.2014 | 09-10 | 122,56 | 122,81 | 123,99 | 122,52 | 5,52 | 128,08 | 128,33 | 129,51 | 128,04 |
| 12.03.2014 | 10-11 | 123,37 | 123,63 | 124,81 | 123,33 | 5,44 | 128,80 | 129,06 | 130,24 | 128,76 |
| 12.03.2014 | 11-12 | 120,07 | 120,32 | 121,47 | 120,03 | 5,80 | 125,86 | 126,11 | 127,26 | 125,82 |
| 12.03.2014 | 12-13 | 108,75 | 108,98 | 110,02 | 108,71 | 5,26 | 114,01 | 114,24 | 115,28 | 113,97 |
| 12.03.2014 | 13-14 | 96,47 | 96,67 | 97,60 | 96,44 | 5,49 | 101,96 | 102,17 | 103,09 | 101,93 |
| 12.03.2014 | 14-15 | 103,80 | 104,02 | 105,02 | 103,77 | 5,27 | 109,07 | 109,29 | 110,29 | 109,04 |
| 12.03.2014 | 15-16 | 90,40 | 90,59 | 91,46 | 90,37 | 5,37 | 95,77 | 95,96 | 96,82 | 95,74 |
| 12.03.2014 | 16-17 | 91,09 | 91,28 | 92,15 | 91,06 | 5,25 | 96,34 | 96,53 | 97,40 | 96,31 |
| 12.03.2014 | 17-18 | 103,14 | 103,35 | 104,34 | 103,10 | 5,02 | 108,15 | 108,37 | 109,36 | 108,12 |
| 12.03.2014 | 18-19 | 95,21 | 95,41 | 96,32 | 95,17 | 4,85 | 100,06 | 100,26 | 101,17 | 100,03 |
| 12.03.2014 | 19-20 | 85,76 | 85,94 | 86,76 | 85,73 | 5,01 | 90,77 | 90,95 | 91,77 | 90,74 |
| 12.03.2014 | 20-21 | 97,76 | 97,96 | 98,90 | 97,73 | 4,84 | 102,60 | 102,80 | 103,74 | 102,56 |
| 12.03.2014 | 21-22 | 95,02 | 95,22 | 96,13 | 94,99 | 4,90 | 99,92 | 100,12 | 101,03 | 99,89 |
| 12.03.2014 | 22-23 | 85,45 | 85,63 | 86,45 | 85,42 | 4,78 | 90,23 | 90,41 | 91,23 | 90,20 |
| 12.03.2014 | 23-00 | 89,59 | 89,77 | 90,63 | 89,56 | 4,66 | 94,25 | 94,43 | 95,29 | 94,22 |
| 13.03.2014 | 00-01 | 116,24 | 116,49 | 117,60 | 116,21 | 5,39 | 121,64 | 121,88 | 122,99 | 121,60 |
| 13.03.2014 | 01-02 | 108,02 | 108,25 | 109,29 | 107,99 | 4,91 | 112,93 | 113,16 | 114,19 | 112,89 |
| 13.03.2014 | 02-03 | 103,03 | 103,25 | 104,23 | 103,00 | 4,93 | 107,96 | 108,17 | 109,16 | 107,92 |
| 13.03.2014 | 03-04 | 89,28 | 89,47 | 90,33 | 89,25 | 4,96 | 94,24 | 94,43 | 95,29 | 94,21 |
| 13.03.2014 | 04-05 | 90,59 | 90,78 | 91,64 | 90,56 | 4,85 | 95,43 | 95,62 | 96,49 | 95,40 |
| 13.03.2014 | 05-06 | 99,59 | 99,80 | 100,76 | 99,56 | 5,01 | 104,60 | 104,81 | 105,76 | 104,57 |
| 13.03.2014 | 06-07 | 88,92 | 89,11 | 89,96 | 88,89 | 5,25 | 94,17 | 94,36 | 95,21 | 94,14 |
| 13.03.2014 | 07-08 | 85,20 | 85,37 | 86,19 | 85,17 | 5,29 | 90,49 | 90,67 | 91,48 | 90,46 |
| 13.03.2014 | 08-09 | 91,75 | 91,94 | 92,82 | 91,72 | 5,11 | 96,85 | 97,05 | 97,92 | 96,82 |
| 13.03.2014 | 09-10 | 89,49 | 89,68 | 90,53 | 89,46 | 4,56 | 94,05 | 94,23 | 95,09 | 94,02 |
| 13.03.2014 | 10-11 | 93,11 | 93,31 | 94,20 | 93,08 | 5,29 | 98,40 | 98,60 | 99,49 | 98,37 |
| 13.03.2014 | 11-12 | 82,79 | 82,97 | 83,76 | 82,77 | 4,80 | 87,59 | 87,77 | 88,56 | 87,57 |
| 13.03.2014 | 12-13 | 107,46 | 107,69 | 108,72 | 107,43 | 5,40 | 112,86 | 113,09 | 114,12 | 112,83 |
| 13.03.2014 | 13-14 | 91,39 | 91,58 | 92,45 | 91,36 | 5,07 | 96,46 | 96,65 | 97,53 | 96,43 |
| 13.03.2014 | 14-15 | 88,36 | 88,54 | 89,39 | 88,33 | 4,41 | 92,77 | 92,96 | 93,80 | 92,74 |
| 13.03.2014 | 15-16 | 110,20 | 110,43 | 111,49 | 110,17 | 5,18 | 115,38 | 115,61 | 116,67 | 115,35 |
| 13.03.2014 | 16-17 | 103,44 | 103,66 | 104,65 | 103,41 | 5,02 | 108,46 | 108,68 | 109,67 | 108,42 |
| 13.03.2014 | 17-18 | 103,33 | 103,54 | 104,53 | 103,29 | 5,37 | 108,69 | 108,91 | 109,90 | 108,66 |
| 13.03.2014 | 18-19 | 105,19 | 105,41 | 106,42 | 105,16 | 5,60 | 110,79 | 111,01 | 112,02 | 110,75 |
| 13.03.2014 | 19-20 | 92,19 | 92,39 | 93,27 | 92,16 | 5,16 | 97,35 | 97,54 | 98,43 | 97,32 |
| 13.03.2014 | 20-21 | 92,80 | 92,99 | 93,88 | 92,77 | 5,00 | 97,79 | 97,99 | 98,88 | 97,76 |
| 13.03.2014 | 21-22 | 94,76 | 94,96 | 95,87 | 94,73 | 5,04 | 99,80 | 100,00 | 100,91 | 99,77 |
| 13.03.2014 | 22-23 | 96,02 | 96,23 | 97,15 | 95,99 | 5,16 | 101,18 | 101,39 | 102,31 | 101,15 |

LIITE 14: KATTILAN SAVUKAASUPUOLELTA ULOS TULEVAT LÄMPÖTEHOT MITTAUSTEN AI- KANA

| PVM | Klo | Säteily- ja johtumishäviöt | | | | Pohjatuhkan mukana lämpöteho | Savukaasun hukateho |
|------------|-------|----------------------------|------|-------|---------|------------------------------|---------------------|
| | | BMA | Uuni | Kuski | Röntgen | | |
| | | MW | MW | MW | MW | MW | MW |
| 10.03.2014 | 14-15 | 1,85 | 1,85 | 1,87 | 1,85 | 0,0027 | 5,26 |
| 10.03.2014 | 15-16 | 2,06 | 2,06 | 2,08 | 2,06 | 0,0028 | 5,82 |
| 10.03.2014 | 16-17 | 2,21 | 2,21 | 2,24 | 2,21 | 0,0027 | 5,98 |
| 10.03.2014 | 17-18 | 2,05 | 2,05 | 2,07 | 2,05 | 0,0028 | 5,84 |
| 10.03.2014 | 18-19 | 1,64 | 1,64 | 1,66 | 1,64 | 0,0030 | 5,66 |
| 10.03.2014 | 19-20 | 1,57 | 1,57 | 1,58 | 1,56 | 0,0027 | 5,76 |
| 10.03.2014 | 20-21 | 1,88 | 1,89 | 1,91 | 1,88 | 0,0029 | 5,81 |
| 10.03.2014 | 21-22 | 1,96 | 1,96 | 1,98 | 1,96 | 0,0028 | 6,07 |
| 10.03.2014 | 22-23 | 1,65 | 1,65 | 1,67 | 1,65 | 0,0027 | 5,62 |
| 10.03.2014 | 23-00 | 2,01 | 2,02 | 2,04 | 2,01 | 0,0028 | 6,11 |
| 11.03.2014 | 00-01 | 2,03 | 2,03 | 2,05 | 2,03 | 0,0028 | 6,16 |
| 11.03.2014 | 01-02 | 1,69 | 1,69 | 1,71 | 1,69 | 0,0028 | 5,68 |
| 11.03.2014 | 02-03 | 1,61 | 1,62 | 1,63 | 1,61 | 0,0028 | 4,83 |
| 11.03.2014 | 03-04 | 1,76 | 1,77 | 1,79 | 1,76 | 0,0028 | 5,05 |
| 11.03.2014 | 04-05 | 1,74 | 1,74 | 1,76 | 1,74 | 0,0029 | 5,62 |
| 11.03.2014 | 05-06 | 1,99 | 2,00 | 2,02 | 1,99 | 0,0030 | 6,04 |
| 11.03.2014 | 06-07 | 2,07 | 2,07 | 2,09 | 2,07 | 0,0028 | 6,40 |
| 11.03.2014 | 07-08 | 1,81 | 1,81 | 1,83 | 1,81 | 0,0028 | 6,07 |
| 11.03.2014 | 08-09 | 2,01 | 2,01 | 2,03 | 2,01 | 0,0029 | 5,85 |
| 11.03.2014 | 09-10 | 2,12 | 2,12 | 2,15 | 2,12 | 0,0028 | 5,88 |
| 11.03.2014 | 10-11 | 2,18 | 2,18 | 2,20 | 2,18 | 0,0028 | 5,89 |
| 11.03.2014 | 11-12 | 2,13 | 2,13 | 2,15 | 2,13 | 0,0028 | 5,80 |
| 11.03.2014 | 12-13 | 1,99 | 2,00 | 2,01 | 1,99 | 0,0028 | 5,59 |
| 11.03.2014 | 13-14 | 1,92 | 1,93 | 1,95 | 1,92 | 0,0028 | 5,55 |
| 11.03.2014 | 14-15 | 1,43 | 1,44 | 1,45 | 1,43 | 0,0027 | 5,22 |
| 11.03.2014 | 15-16 | 1,56 | 1,56 | 1,58 | 1,56 | 0,0028 | 5,15 |
| 11.03.2014 | 16-17 | 1,63 | 1,63 | 1,65 | 1,63 | 0,0027 | 5,28 |
| 11.03.2014 | 17-18 | 1,79 | 1,79 | 1,81 | 1,79 | 0,0027 | 5,66 |
| 11.03.2014 | 18-19 | 1,71 | 1,71 | 1,73 | 1,71 | 0,0027 | 5,73 |
| 11.03.2014 | 19-20 | 1,77 | 1,77 | 1,79 | 1,76 | 0,0029 | 5,71 |
| 11.03.2014 | 20-21 | 1,81 | 1,81 | 1,83 | 1,81 | 0,0029 | 5,68 |
| 11.03.2014 | 21-22 | 1,34 | 1,34 | 1,36 | 1,34 | 0,0028 | 4,66 |
| 11.03.2014 | 22-23 | 1,51 | 1,52 | 1,53 | 1,51 | 0,0028 | 4,75 |
| 11.03.2014 | 23-00 | 1,54 | 1,54 | 1,55 | 1,54 | 0,0028 | 5,65 |
| 12.03.2014 | 00-01 | 1,51 | 1,51 | 1,52 | 1,51 | 0,0030 | 5,52 |
| 12.03.2014 | 01-02 | 1,76 | 1,76 | 1,78 | 1,76 | 0,0029 | 5,66 |
| 12.03.2014 | 02-03 | 2,11 | 2,12 | 2,14 | 2,11 | 0,0028 | 6,50 |
| 12.03.2014 | 03-04 | 2,33 | 2,33 | 2,36 | 2,33 | 0,0028 | 6,67 |
| 12.03.2014 | 04-05 | 2,33 | 2,34 | 2,36 | 2,33 | 0,0029 | 6,49 |
| 12.03.2014 | 05-06 | 2,01 | 2,02 | 2,04 | 2,01 | 0,0030 | 6,20 |
| 12.03.2014 | 06-07 | 2,23 | 2,23 | 2,25 | 2,23 | 0,0029 | 7,00 |
| 12.03.2014 | 07-08 | 1,99 | 1,99 | 2,01 | 1,99 | 0,0030 | 6,94 |
| 12.03.2014 | 08-09 | 2,23 | 2,24 | 2,26 | 2,23 | 0,0030 | 6,76 |
| 12.03.2014 | 09-10 | 2,45 | 2,46 | 2,48 | 2,45 | 0,0029 | 7,04 |
| 12.03.2014 | 10-11 | 2,47 | 2,47 | 2,50 | 2,47 | 0,0029 | 7,10 |
| 12.03.2014 | 11-12 | 2,40 | 2,41 | 2,43 | 2,40 | 0,0028 | 7,65 |
| 12.03.2014 | 12-13 | 2,18 | 2,18 | 2,20 | 2,17 | 0,0029 | 6,71 |
| 12.03.2014 | 13-14 | 1,93 | 1,93 | 1,95 | 1,93 | 0,0027 | 6,88 |
| 12.03.2014 | 14-15 | 2,08 | 2,08 | 2,10 | 2,08 | 0,0028 | 6,71 |
| 12.03.2014 | 15-16 | 1,81 | 1,81 | 1,83 | 1,81 | 0,0030 | 6,58 |
| 12.03.2014 | 16-17 | 1,82 | 1,83 | 1,84 | 1,82 | 0,0030 | 6,38 |
| 12.03.2014 | 17-18 | 2,06 | 2,07 | 2,09 | 2,06 | 0,0030 | 6,35 |
| 12.03.2014 | 18-19 | 1,90 | 1,91 | 1,93 | 1,90 | 0,0028 | 6,23 |
| 12.03.2014 | 19-20 | 1,72 | 1,72 | 1,74 | 1,71 | 0,0029 | 6,30 |
| 12.03.2014 | 20-21 | 1,96 | 1,96 | 1,98 | 1,95 | 0,0030 | 6,29 |
| 12.03.2014 | 21-22 | 1,90 | 1,90 | 1,92 | 1,90 | 0,0030 | 6,39 |
| 12.03.2014 | 22-23 | 1,71 | 1,71 | 1,73 | 1,71 | 0,0030 | 5,92 |
| 12.03.2014 | 23-00 | 1,79 | 1,80 | 1,81 | 1,79 | 0,0030 | 5,84 |
| 13.03.2014 | 00-01 | 2,32 | 2,33 | 2,35 | 2,32 | 0,0031 | 6,94 |
| 13.03.2014 | 01-02 | 2,16 | 2,17 | 2,19 | 2,16 | 0,0031 | 6,40 |
| 13.03.2014 | 02-03 | 2,06 | 2,06 | 2,08 | 2,06 | 0,0031 | 6,31 |
| 13.03.2014 | 03-04 | 1,79 | 1,79 | 1,81 | 1,79 | 0,0031 | 6,22 |
| 13.03.2014 | 04-05 | 1,81 | 1,82 | 1,83 | 1,81 | 0,0030 | 6,05 |
| 13.03.2014 | 05-06 | 1,99 | 2,00 | 2,02 | 1,99 | 0,0030 | 6,37 |
| 13.03.2014 | 06-07 | 1,78 | 1,78 | 1,80 | 1,78 | 0,0029 | 6,37 |
| 13.03.2014 | 07-08 | 1,70 | 1,71 | 1,72 | 1,70 | 0,0029 | 6,45 |
| 13.03.2014 | 08-09 | 1,83 | 1,84 | 1,86 | 1,83 | 0,0030 | 6,25 |
| 13.03.2014 | 09-10 | 1,79 | 1,79 | 1,81 | 1,79 | 0,0031 | 5,66 |
| 13.03.2014 | 10-11 | 1,86 | 1,87 | 1,88 | 1,86 | 0,0029 | 6,46 |
| 13.03.2014 | 11-12 | 1,66 | 1,66 | 1,68 | 1,66 | 0,0029 | 5,89 |
| 13.03.2014 | 12-13 | 2,15 | 2,15 | 2,17 | 2,15 | 0,0030 | 6,86 |
| 13.03.2014 | 13-14 | 1,83 | 1,83 | 1,85 | 1,83 | 0,0031 | 6,44 |
| 13.03.2014 | 14-15 | 1,77 | 1,77 | 1,79 | 1,77 | 0,0031 | 5,81 |
| 13.03.2014 | 15-16 | 2,20 | 2,21 | 2,23 | 2,20 | 0,0031 | 6,81 |
| 13.03.2014 | 16-17 | 2,07 | 2,07 | 2,09 | 2,07 | 0,0032 | 6,61 |
| 13.03.2014 | 17-18 | 2,07 | 2,07 | 2,09 | 2,07 | 0,0032 | 6,89 |
| 13.03.2014 | 18-19 | 2,10 | 2,11 | 2,13 | 2,10 | 0,0031 | 7,00 |
| 13.03.2014 | 19-20 | 1,84 | 1,85 | 1,87 | 1,84 | 0,0031 | 6,35 |
| 13.03.2014 | 20-21 | 1,86 | 1,86 | 1,88 | 1,86 | 0,0031 | 6,35 |
| 13.03.2014 | 21-22 | 1,90 | 1,90 | 1,92 | 1,89 | 0,0031 | 6,41 |
| 13.03.2014 | 22-23 | 1,92 | 1,92 | 1,94 | 1,92 | 0,0031 | 6,44 |

LIITE 15: VESI-HÖYRYPIIRIN LÄMPÖTILAT, PAINEET, ENTALPIAT, MASSAVIRRAT JA LÄMPÖTEHOT

| PVM | Klo | Syöttövesi | | | Korkeapainehöyry | | | KP-höyryn massavirta | Lämpö höyryyn |
|------------|-------|-----------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|-------------------------|------------------|
| | | Lämpötila °C | Paine bar | Entalpia kJ/kg | Lämpötila °C | Paine bar | Entalpia kJ/kg | | |
| 10.03.2014 | 14-15 | 184,8 | 110,9 | 784,4158 | 519,4 | 104,7 | 3419,412 | 27,9 | 73,56082 |
| 10.03.2014 | 15-16 | 185,5 | 111,2 | 787,3848 | 519,1 | 104,3 | 3419,264 | 29,6 | 77,81923 |
| 10.03.2014 | 16-17 | 175,3 | 113,0 | 742,5501 | 520,4 | 105,2 | 3421,34 | 30,5 | 81,71984 |
| 10.03.2014 | 17-18 | 176,4 | 113,0 | 747,3891 | 519,7 | 105,1 | 3419,847 | 30,5 | 81,4585 |
| 10.03.2014 | 18-19 | 180,0 | 114,3 | 763,0092 | 519,9 | 106,3 | 3419,043 | 30,8 | 81,77839 |
| 10.03.2014 | 19-20 | 177,6 | 112,3 | 752,5588 | 519,6 | 104,5 | 3420,115 | 31,3 | 83,53151 |
| 10.03.2014 | 20-21 | 183,3 | 112,0 | 777,7954 | 520,8 | 104,5 | 3423,194 | 31,3 | 82,69695 |
| 10.03.2014 | 21-22 | 182,1 | 113,7 | 772,602 | 519,5 | 105,3 | 3418,964 | 32,0 | 84,59202 |
| 10.03.2014 | 22-23 | 177,7 | 113,3 | 753,1238 | 519,6 | 105,4 | 3419,121 | 30,9 | 82,31797 |
| 10.03.2014 | 23-00 | 178,0 | 112,3 | 754,5446 | 520,1 | 104,0 | 3421,977 | 32,7 | 87,17127 |
| 11.03.2014 | 00-01 | 177,7 | 114,2 | 753,0538 | 520,3 | 105,7 | 3420,567 | 31,9 | 84,98636 |
| 11.03.2014 | 01-02 | 175,7 | 113,5 | 744,0617 | 520,1 | 105,8 | 3420,162 | 30,4 | 81,35149 |
| 11.03.2014 | 02-03 | 182,1 | 110,5 | 772,544 | 519,5 | 104,8 | 3419,602 | 26,0 | 68,84271 |
| 11.03.2014 | 03-04 | 182,9 | 110,8 | 776,0942 | 519,8 | 104,9 | 3420,152 | 26,5 | 70,07984 |
| 11.03.2014 | 04-05 | 186,6 | 112,5 | 792,2651 | 519,5 | 105,0 | 3419,381 | 30,2 | 79,24275 |
| 11.03.2014 | 05-06 | 184,3 | 112,9 | 782,2669 | 520,3 | 104,7 | 3421,813 | 31,9 | 84,2507 |
| 11.03.2014 | 06-07 | 172,7 | 113,3 | 730,9984 | 521,6 | 104,9 | 3424,968 | 32,5 | 87,6786 |
| 11.03.2014 | 07-08 | 172,3 | 114,5 | 729,1748 | 519,6 | 105,6 | 3418,819 | 33,3 | 89,50418 |
| 11.03.2014 | 08-09 | 180,7 | 111,7 | 766,2725 | 520,2 | 104,1 | 3422,122 | 31,8 | 84,49974 |
| 11.03.2014 | 09-10 | 180,5 | 112,0 | 765,4045 | 519,2 | 104,6 | 3419,069 | 30,4 | 80,579 |
| 11.03.2014 | 10-11 | 173,9 | 113,0 | 736,1647 | 520,1 | 105,5 | 3420,187 | 30,2 | 81,05734 |
| 11.03.2014 | 11-12 | 177,2 | 112,1 | 751,0472 | 519,6 | 104,8 | 3419,846 | 29,9 | 79,78896 |
| 11.03.2014 | 12-13 | 179,9 | 112,4 | 762,6351 | 520,2 | 105,0 | 3421,146 | 29,7 | 79,03575 |
| 11.03.2014 | 13-14 | 181,2 | 112,5 | 768,6448 | 515,9 | 105,3 | 3409,702 | 29,4 | 77,70507 |
| 11.03.2014 | 14-15 | 179,2 | 113,2 | 759,6377 | 519,2 | 105,9 | 3417,406 | 28,7 | 76,24593 |
| 11.03.2014 | 15-16 | 183,4 | 110,8 | 778,1513 | 520,1 | 104,3 | 3421,733 | 28,4 | 75,19037 |
| 11.03.2014 | 16-17 | 184,7 | 112,6 | 784,0654 | 520,1 | 105,2 | 3420,534 | 29,7 | 78,30196 |
| 11.03.2014 | 17-18 | 183,0 | 111,4 | 776,6471 | 520,2 | 104,1 | 3422,129 | 30,6 | 81,04645 |
| 11.03.2014 | 18-19 | 181,0 | 114,3 | 767,6498 | 519,8 | 106,1 | 3418,839 | 31,1 | 82,47836 |
| 11.03.2014 | 19-20 | 178,8 | 111,8 | 758,1029 | 519,8 | 104,0 | 3421,268 | 31,3 | 83,32279 |
| 11.03.2014 | 20-21 | 181,9 | 113,4 | 771,7846 | 520,2 | 105,6 | 3420,549 | 30,8 | 81,66223 |
| 11.03.2014 | 21-22 | 181,9 | 111,4 | 771,6293 | 519,3 | 105,5 | 3418,3 | 26,2 | 69,23553 |
| 11.03.2014 | 22-23 | 182,3 | 110,6 | 773,4401 | 518,9 | 104,6 | 3418,192 | 26,6 | 70,3011 |
| 11.03.2014 | 23-00 | 187,2 | 113,7 | 795,1194 | 519,3 | 105,4 | 3418,337 | 31,6 | 82,89396 |
| 12.03.2014 | 00-01 | 179,1 | 112,7 | 759,0579 | 520,0 | 104,8 | 3420,835 | 31,3 | 83,42901 |
| 12.03.2014 | 01-02 | 180,6 | 112,2 | 765,6275 | 519,7 | 104,2 | 3420,769 | 31,4 | 83,41867 |
| 12.03.2014 | 02-03 | 171,9 | 114,0 | 727,7521 | 519,9 | 104,4 | 3421,106 | 35,0 | 94,34411 |
| 12.03.2014 | 03-04 | 171,5 | 114,6 | 725,8097 | 520,1 | 104,6 | 3421,214 | 35,6 | 95,9351 |
| 12.03.2014 | 04-05 | 170,8 | 115,1 | 722,6822 | 520,2 | 105,2 | 3420,838 | 34,6 | 93,43751 |
| 12.03.2014 | 05-06 | 178,4 | 115,5 | 756,1383 | 520,6 | 106,0 | 3420,984 | 33,8 | 90,04328 |
| 12.03.2014 | 06-07 | 173,5 | 115,6 | 734,5462 | 519,4 | 104,5 | 3419,735 | 37,5 | 100,7743 |
| 12.03.2014 | 07-08 | 164,6 | 117,1 | 695,6605 | 519,8 | 105,3 | 3419,718 | 38,2 | 104,1358 |
| 12.03.2014 | 08-09 | 171,8 | 115,1 | 727,0974 | 520,1 | 104,4 | 3421,629 | 37,1 | 100,0014 |
| 12.03.2014 | 09-10 | 166,7 | 115,9 | 704,6987 | 519,7 | 104,8 | 3420,097 | 37,4 | 101,4879 |
| 12.03.2014 | 10-11 | 169,0 | 114,1 | 714,6293 | 519,2 | 102,7 | 3421,285 | 37,6 | 101,7192 |
| 12.03.2014 | 11-12 | 161,5 | 116,8 | 682,3081 | 521,8 | 105,1 | 3425,185 | 38,9 | 106,8 |
| 12.03.2014 | 12-13 | 170,9 | 115,0 | 723,0454 | 517,3 | 104,6 | 3413,998 | 36,8 | 98,97637 |
| 12.03.2014 | 13-14 | 172,1 | 115,6 | 728,567 | 519,2 | 104,8 | 3418,661 | 37,4 | 100,5569 |
| 12.03.2014 | 14-15 | 173,0 | 114,8 | 732,5267 | 519,9 | 104,6 | 3420,831 | 36,6 | 98,4023 |
| 12.03.2014 | 15-16 | 174,5 | 116,4 | 739,1359 | 519,7 | 105,8 | 3418,888 | 36,1 | 96,80735 |
| 12.03.2014 | 16-17 | 173,6 | 114,4 | 734,7997 | 519,7 | 104,4 | 3420,544 | 35,7 | 95,88106 |
| 12.03.2014 | 17-18 | 176,2 | 114,2 | 746,385 | 520,4 | 104,6 | 3422,198 | 34,9 | 93,47148 |
| 12.03.2014 | 18-19 | 180,5 | 115,1 | 765,5368 | 520,2 | 105,8 | 3420,163 | 33,9 | 90,01733 |
| 12.03.2014 | 19-20 | 178,0 | 114,7 | 754,1787 | 519,6 | 105,1 | 3419,423 | 34,2 | 91,03969 |
| 12.03.2014 | 20-21 | 181,1 | 113,5 | 768,1139 | 520,3 | 104,4 | 3422,024 | 34,3 | 91,1154 |
| 12.03.2014 | 21-22 | 182,1 | 115,3 | 772,6791 | 520,0 | 105,6 | 3419,988 | 34,5 | 91,40691 |
| 12.03.2014 | 22-23 | 180,3 | 114,3 | 764,7135 | 519,7 | 105,2 | 3419,699 | 33,1 | 88,00616 |
| 12.03.2014 | 23-00 | 183,3 | 113,1 | 777,7697 | 519,6 | 104,6 | 3420,005 | 32,2 | 85,20042 |
| 13.03.2014 | 00-01 | 175,4 | 114,3 | 742,8622 | 517,6 | 103,8 | 3415,837 | 36,5 | 97,69332 |
| 13.03.2014 | 01-02 | 178,2 | 115,4 | 755,2589 | 520,2 | 105,7 | 3420,279 | 34,2 | 91,21621 |
| 13.03.2014 | 02-03 | 181,2 | 114,5 | 768,572 | 519,7 | 105,2 | 3419,553 | 34,1 | 90,30091 |
| 13.03.2014 | 03-04 | 179,3 | 115,0 | 759,9323 | 519,7 | 105,6 | 3419,268 | 33,6 | 89,29836 |
| 13.03.2014 | 04-05 | 180,8 | 113,7 | 766,5964 | 520,0 | 104,8 | 3420,793 | 33,3 | 88,34333 |
| 13.03.2014 | 05-06 | 182,2 | 114,4 | 772,852 | 520,1 | 104,8 | 3421,208 | 34,5 | 91,26523 |
| 13.03.2014 | 06-07 | 174,9 | 115,2 | 740,7577 | 521,2 | 105,5 | 3423,24 | 34,3 | 91,99601 |
| 13.03.2014 | 07-08 | 170,9 | 114,6 | 723,3531 | 519,6 | 104,9 | 3419,657 | 34,9 | 94,08159 |
| 13.03.2014 | 08-09 | 177,9 | 114,0 | 753,7948 | 519,7 | 104,9 | 3420,049 | 34,6 | 92,13339 |
| 13.03.2014 | 09-10 | 183,0 | 112,5 | 776,5975 | 519,3 | 104,6 | 3419,196 | 31,0 | 82,0213 |
| 13.03.2014 | 10-11 | 180,9 | 115,7 | 767,1592 | 520,1 | 105,5 | 3420,342 | 35,4 | 93,95847 |
| 13.03.2014 | 11-12 | 178,0 | 114,5 | 754,2739 | 520,3 | 105,6 | 3420,823 | 32,8 | 87,46195 |
| 13.03.2014 | 12-13 | 181,2 | 114,8 | 768,3212 | 519,3 | 104,3 | 3419,628 | 36,7 | 97,30372 |
| 13.03.2014 | 13-14 | 174,7 | 116,2 | 739,63 | 519,6 | 105,8 | 3418,827 | 35,7 | 95,68483 |
| 13.03.2014 | 14-15 | 181,0 | 112,9 | 767,4447 | 520,1 | 104,6 | 3421,272 | 31,8 | 84,49398 |
| 13.03.2014 | 15-16 | 176,2 | 114,7 | 746,4449 | 519,6 | 104,3 | 3420,42 | 36,6 | 97,87458 |
| 13.03.2014 | 16-17 | 175,4 | 115,9 | 742,9817 | 520,3 | 105,6 | 3420,663 | 35,6 | 95,33423 |
| 13.03.2014 | 17-18 | 173,9 | 115,6 | 736,3588 | 519,9 | 104,6 | 3420,845 | 37,5 | 100,5911 |
| 13.03.2014 | 18-19 | 167,1 | 116,4 | 706,3358 | 519,7 | 104,8 | 3419,99 | 38,1 | 103,2571 |
| 13.03.2014 | 19-20 | 171,0 | 115,5 | 723,5465 | 519,2 | 105,4 | 3418,154 | 35,1 | 94,49231 |
| 13.03.2014 | 20-21 | 173,7 | 114,6 | 735,3222 | 520,2 | 104,9 | 3421,122 | 34,9 | 93,67118 |
| 13.03.2014 | 21-22 | 176,1 | 114,4 | 745,8448 | 519,9 | 104,7 | 3420,772 | 34,9 | 93,37191 |
| 13.03.2014 | 22-23 | 175,9 | 115,2 | 745,2633 | 520,0 | 105,1 | 3420,542 | 35,1 | 93,8809 |

LIITE 16: JUP-HÖYRYN MASSAVIRTA, LÄMPÖTI- LA, PAINE, ENTALPIA JA HUKKATEHO

| | | Massavirta | Lämpötila | Paine | Entalpia | Hukkateho |
|------------|-------|------------|-----------|--------|----------|-----------|
| PVM | Klo | kg/s | °C | bar | kJ/kg | MW |
| 10.03.2014 | 14-15 | 0,24 | 139,34 | 110,07 | 593,36 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 15-16 | 0,24 | 139,18 | 110,33 | 592,69 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 16-17 | 0,24 | 139,25 | 112,04 | 593,10 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 17-18 | 0,24 | 139,11 | 112,05 | 592,48 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 18-19 | 0,25 | 139,50 | 113,36 | 594,25 | 0,15 |
| 10.03.2014 | 19-20 | 0,24 | 139,08 | 111,37 | 592,34 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 20-21 | 0,24 | 139,36 | 111,06 | 593,49 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 21-22 | 0,24 | 139,15 | 112,72 | 592,73 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 22-23 | 0,24 | 139,41 | 112,39 | 593,79 | 0,14 |
| 10.03.2014 | 23-00 | 0,24 | 139,05 | 111,28 | 592,20 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 00-01 | 0,24 | 139,38 | 113,19 | 593,74 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 01-02 | 0,24 | 139,18 | 112,55 | 592,83 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 02-03 | 0,24 | 139,41 | 109,69 | 593,60 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 03-04 | 0,24 | 139,37 | 110,00 | 593,46 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 04-05 | 0,24 | 139,23 | 111,58 | 593,00 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 05-06 | 0,24 | 139,40 | 111,84 | 593,73 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 06-07 | 0,24 | 139,16 | 112,26 | 592,73 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 07-08 | 0,25 | 139,22 | 113,50 | 593,07 | 0,15 |
| 11.03.2014 | 08-09 | 0,24 | 139,40 | 110,73 | 593,66 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 09-10 | 0,24 | 139,45 | 111,10 | 593,88 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 10-11 | 0,24 | 139,49 | 112,09 | 594,10 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 11-12 | 0,24 | 139,27 | 111,13 | 593,11 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 12-13 | 0,24 | 139,44 | 111,50 | 593,85 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 13-14 | 0,24 | 139,51 | 111,61 | 594,15 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 14-15 | 0,24 | 139,50 | 112,24 | 594,17 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 15-16 | 0,24 | 139,48 | 109,90 | 593,91 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 16-17 | 0,24 | 139,50 | 111,63 | 594,13 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 17-18 | 0,24 | 139,36 | 110,48 | 593,45 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 18-19 | 0,25 | 139,63 | 113,26 | 594,79 | 0,15 |
| 11.03.2014 | 19-20 | 0,24 | 139,25 | 110,80 | 593,01 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 20-21 | 0,24 | 139,51 | 112,47 | 594,21 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 21-22 | 0,24 | 139,56 | 110,55 | 594,31 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 22-23 | 0,24 | 139,45 | 109,75 | 593,80 | 0,14 |
| 11.03.2014 | 23-00 | 0,25 | 139,28 | 112,69 | 593,27 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 00-01 | 0,24 | 139,30 | 111,59 | 593,28 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 01-02 | 0,24 | 139,27 | 111,12 | 593,10 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 02-03 | 0,24 | 139,12 | 112,87 | 592,58 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 03-04 | 0,24 | 139,04 | 113,37 | 592,29 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 04-05 | 0,25 | 139,06 | 113,86 | 592,40 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 05-06 | 0,25 | 139,16 | 114,35 | 592,85 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 06-07 | 0,25 | 138,93 | 114,35 | 591,90 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 07-08 | 0,25 | 138,51 | 115,80 | 590,20 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 08-09 | 0,25 | 138,77 | 113,81 | 591,16 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 09-10 | 0,25 | 139,13 | 114,65 | 592,75 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 10-11 | 0,24 | 138,91 | 112,84 | 591,69 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 11-12 | 0,25 | 138,44 | 115,46 | 589,89 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 12-13 | 0,24 | 138,65 | 113,77 | 590,68 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 13-14 | 0,25 | 138,85 | 114,36 | 591,56 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 14-15 | 0,24 | 139,06 | 113,62 | 592,39 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 15-16 | 0,25 | 139,01 | 115,23 | 592,27 | 0,15 |
| 12.03.2014 | 16-17 | 0,24 | 139,05 | 113,27 | 592,31 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 17-18 | 0,24 | 139,04 | 113,03 | 592,28 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 18-19 | 0,24 | 139,11 | 113,98 | 592,65 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 19-20 | 0,24 | 139,01 | 113,54 | 592,17 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 20-21 | 0,24 | 139,09 | 112,39 | 592,45 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 21-22 | 0,24 | 139,09 | 114,14 | 592,55 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 22-23 | 0,24 | 139,17 | 113,17 | 592,82 | 0,14 |
| 12.03.2014 | 23-00 | 0,24 | 139,15 | 112,09 | 592,67 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 00-01 | 0,24 | 138,90 | 113,03 | 591,65 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 01-02 | 0,25 | 139,03 | 114,21 | 592,28 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 02-03 | 0,25 | 139,00 | 113,40 | 592,12 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 03-04 | 0,25 | 139,04 | 113,90 | 592,31 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 04-05 | 0,24 | 139,04 | 112,67 | 592,24 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 05-06 | 0,24 | 139,05 | 113,23 | 592,33 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 06-07 | 0,25 | 138,85 | 113,99 | 591,52 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 07-08 | 0,25 | 138,40 | 113,39 | 589,57 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 08-09 | 0,24 | 138,98 | 112,89 | 592,02 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 09-10 | 0,24 | 139,12 | 111,52 | 592,51 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 10-11 | 0,25 | 138,77 | 114,52 | 591,21 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 11-12 | 0,24 | 138,98 | 113,41 | 592,04 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 12-13 | 0,24 | 138,70 | 113,54 | 590,85 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 13-14 | 0,25 | 138,71 | 115,07 | 590,99 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 14-15 | 0,24 | 139,15 | 111,88 | 592,65 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 15-16 | 0,24 | 138,83 | 113,44 | 591,38 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 16-17 | 0,25 | 138,95 | 114,77 | 591,98 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 17-18 | 0,25 | 138,52 | 114,29 | 590,13 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 18-19 | 0,25 | 138,61 | 115,11 | 590,55 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 19-20 | 0,25 | 138,84 | 114,37 | 591,50 | 0,15 |
| 13.03.2014 | 20-21 | 0,24 | 138,93 | 113,44 | 591,82 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 21-22 | 0,24 | 138,91 | 113,26 | 591,72 | 0,14 |
| 13.03.2014 | 22-23 | 0,25 | 138,96 | 114,01 | 591,98 | 0,15 |